

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**LIBEREC 2010**

**Bc. JIŘÍ NĚMEC**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**



Studijní program: N3108 Průmyslový management

Studijní obor: 3106T014 Produktový management

## **ANALÝZA PŘÍČIN PORUCH PLASTŮ**

(praskliny v oblasti krku PET lahví)

## **PLASTIC ANALYSIS OF REASONS DISORDERS**

(Cracking in neck area of Ref.PET bottles)

Bc. Jiří Němec

KHT-004

**Vedoucí diplomové práce:** Ing. Vladimír Kovačič

### **Rozsah práce:**

Počet stran textu .....60

Počet obrázků .....17

Počet tabulek .....3

Počet grafů .....17

Počet stran příloh.. .... 26

Zadání diplomové práce

(vložit originál)

## **PROHLÁŠENÍ**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 30. 4. 2010

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat Ing. Vladimíru Kovačičovi za vedení této diplomové práce a za cenné rady a připomínky, které mi poskytoval při konzultacích po celou dobu tvorby této diplomové práce.

Dík patří i ostatním, a to nejen těm, kteří mě v mojí práci po celou dobu studia podporovali, ale také společnosti REXAM Petainer Aš, s. r. o., ve které jsem na diplomové práci měl možnost prakticky pracovat.

## ANOTACE

Cílem této diplomové práce je zmapovat analýzy příčin prasklin vedoucích k odstranění defektu (prasklin), který se neřízeným způsobem objevoval na produktech společnosti REXAM Petainer Aš s.r.o. Teoretická část se zabývá chováním, rozdělením, mechanickými a chemickými vlastnostmi plastů, konkrétně polyethylentereftalátu (PET), ze kterého se vratné lahve vyrábí. Praktická část je spojena se zcela reálným postupem řízení projektu, který je v interní evidenci veden jako projekt #101.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** společnost Rexam Petainer Aš s.r.o., plasty, Six Sigma, projekt a jeho řízení, vstřikovací a vyfukovací proces, IV, praskliny.

## ANNOTATION

The aim of this thesis is the analysis of the causes of cracks leading to the elimination of defects (cracks), which is uncontrolled manner, appeared to Product REXAM Petainer Aš s.r.o. The theoretical part deals with the behaviour, distribution, mechanical and chemical properties of plastics, specifically polyethylene terephthalate (PET), from which is returnable Ref.PET bottles produced. The practical part is associated with entirely realistic project management procedures, which is recognized as an internal record of one hundred and first Projects # 101 (company's internal code).

**KEYWORDS:** company Rexam Petainer Aš s.r.o., Plastics, Six Sigma, project and its management, injection and blow moulding process, IV, cracks.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>O SPOLEČNOSTI .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Stručná historie a současnost .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Výrobní portfolio.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3</b>	<b>Podniková kultura vymezení podniku .....</b>	<b>13</b>
2.3.1	Six sigma .....	14
2.3.2	Koncept DMAIC.....	14
2.3.3	Etapa Define .....	15
2.3.4	Etapa Measure .....	16
2.3.5	Etapa Analyse.....	16
2.3.6	Etapa Improve.....	16
2.3.7	Etapa Control .....	16
<b>2.4</b>	<b>Využití nástrojů Six Sigmy .....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>PLASTY GLOBÁLNĚ.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Klasifikace plastů .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Struktura plastů .....</b>	<b>23</b>
3.2.1	Morfologie plastů .....	25
3.2.2	Monomer versus polymer .....	28
<b>4</b>	<b>PET MATERIÁL .....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Prvotní hypotézy a metody.....</b>	<b>31</b>
<b>5.2</b>	<b>Nástin průběhu celkové analýzy příčin prasklin .....</b>	<b>36</b>
5.2.1	LoopTest .....	36
5.2.2	Externí testy a analýzy resinu .....	38
5.2.3	Analýza resinu.....	43

5.3	Návrhy vyplývající z analýzy projektu # 101 .....	49
6	ZÁVĚR .....	50
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	52
8	SEZNAM ZKRATEK.....	54
9	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	55
10	SEZNAM SCHÉMAT.....	56
11	SEZNAM TABULEK.....	56
12	SEZNAM GRAFŮ .....	56
13	SEZNAM PŘÍLOH .....	57
	PŘÍLOHA .....	58



# 1 ÚVOD

V roce 1862 představil britský chemik Alexander Parkes první plast. Na dalším vývoji pracoval americký vědec John Wesley Hyatt i americký chemik Lee Beekelanda. Po jejich objevech následovaly další a další objevy plastů. V současné době jsou plasty lehké, ale zároveň pevné, dobře tvárné, mají výborné tepelně izolační vlastnosti a snadno se barví. Nepodléhají korozi, ani tlení, mají dlouhou životnost. Většina z nich lze vyrábět ve formě vláken, která se spřádají a dokáží plnohodnotně nahradit přírodní vlákno.

Obsah pojmu plasty je velmi široký a tato diplomová práce se věnuje zejména termoplastu ze skupiny polyesterů, tedy polyethylentereftalátu známému pod zkratkou PET. Ten se totiž využívá při výrobě lahví ve společnosti, ve které tato diplomová práce byla realizována. Jako člen realizačního týmu této firmy jsem měl čest vést projekt #101 Stress cracking under neck, který měl zmapovat příčiny prasklin Ref.PET lahví v oblasti krku, navrhnout možná řešení a co nejkvalitněji odstranit problém (vyskytující se defekt).

Činnost této skupiny byla rozsáhlá a náročná, a proto se tato diplomová práce zabývá pouze základními postupy výzkumu. Tomuto záměru je podřízena i struktura diplomové práce, která je rozdělena do tří základních částí. První část představuje společnost a seznamuje s filozofií této firmy i základním přístupem ke zkvalitnění své výroby pod názvem Six Sigma. Druhá část nabízí jasný přehled klasifikace plastů, jejich strukturu a třetí část navazuje se základními fakty o PET materiálu. Ve čtvrté kapitole se diplomová práce věnuje vlastnímu výzkumu, tedy analýze příčin poruch plastů, praskliny v oblasti krku Ref.PET lahví a zároveň sleduje systém práce realizačního týmu. Na počátku byly stanoveny základní hypotézy a metody, které při vlastní realizaci výzkumu vedly k pozitivním i negativním závěrům. V závěru je patrná snaha o souhrnný pohled na celý výzkum a zároveň o zhodnocení získaných faktů a informací při analýze příčin prasklin.

Cílem této diplomové práce je nastínit systém práce realizačního týmu společnosti a zmapovat příčiny prasklin PET lahví.

## 2 O SPOLEČNOSTI

Společnost je jednou z dceřiných společností celosvětovém koncernu, který má ústředí v Londýně a pomocí svých dceřiných společností vyrábí a dodává obaly pro kosmetiku, zdravotnictví, potraviny a nápoje na trhy v Evropě, Americe a Asii. Na diplomová práci bylo pracováno ve společnosti, která se zabývá výrobou vratných plastových lahví zejména pro nealkoholické nápoje. Své výrobky společnost dodává významným firmám na německém a skandinávském trhu (Coca-Cola, Carlsberg, Adelholzener atd.).



*Obrázek 1 – Objekt společnosti*

### 2.1 Stručná historie a současnost

Historie firmy sahá do roku 1996, kdy byl na „zelené louce“ v Aši postaven společností PLM objekt výrobního závodu. Tou dobou vykazoval trh vratných lahví významný meziroční nárůst a jevil se velmi perspektivně. Společnost PLM reagovala na tuto skutečnost a na strategicky výhodném místě v blízkosti česko-německých státních hranic si zajistila výrobu Ref.PET lahví pro německý trh.

V roce 1997 byl výrobní proces skutečně v Aši zahájen, i když jen omezeně. Preformy se ve zdejší hale nevyráběly, ale nakupovaly u mateřské firmy ve Švédsku. V Aši se pouze vyfukovaly na lahve, které byly (a dosud jsou) distribuovány výhradně pro západní trhy (především Německo).

Výrobní provoz v Aši prošel auditem, ten je stále prováděn pravidelně každé dva roky, a záhy byl akreditován společností Coca-Cola, která má pro své dodavatele nastaveny velmi přísné standardy a jejich akreditace představuje vrchol kvality v daném předmětu podnikání. Skupina PLM, později pobočka naší společnosti, se tak stala výhradním dodavatelem Ref.PET lahví pro společnost Coca-Cola na německém trhu. V roce 1998 navíc získala certifikát ISO 9001 (systém řízení kvality), který je také pravidelně obnovován.

O rok později (v roce 1999) byla celá skupina PLM zakoupena jiným gigantem v oboru, který je v současné době druhým největším výrobcem spotřebitelských obalů na světě.

V roce 2001 byl přerušen dovoz preforem ze Švédska a ašská společnost zahájila jejich výrobu. Firma tak získal nezávislý a soběstačný výrobní provoz, který v roce 2002 získává certifikaci ISO 14001 (vztah firmy k životnímu prostředí). I tato certifikace je neustále obnovována.

Neustálé zvyšování kvality provozu a plnění velmi přísně nastavených standardů přispělo k získání ocenění „Best Plant“, které uděluje nový majitel uvnitř své skupiny pouze dvěma až třem firmám. V rámci hodnocení se především kontrolují finanční a dané ukazatele výkonnosti (kvalita, efektivita aj.). Toto ocenění bylo získáno v roce 2003.

Předchozí úspěch stupňuje zlatá medaile „Lean Gold“ z roku 2006 za nejlepší provoz štíhlého podnikání, do kterého se zahrnuje hodnocení 3 složek – audit bezpečnosti práce, posouzení klíčových ukazatelů výkonnosti (reklamace, včasnost dodávek, efektivita výroby, výrobní odpad apod.) a vlastní audit manažerské kultury (pořádek na pracovišti, systém údržby strojů, systém přestavby strojů, apod.).

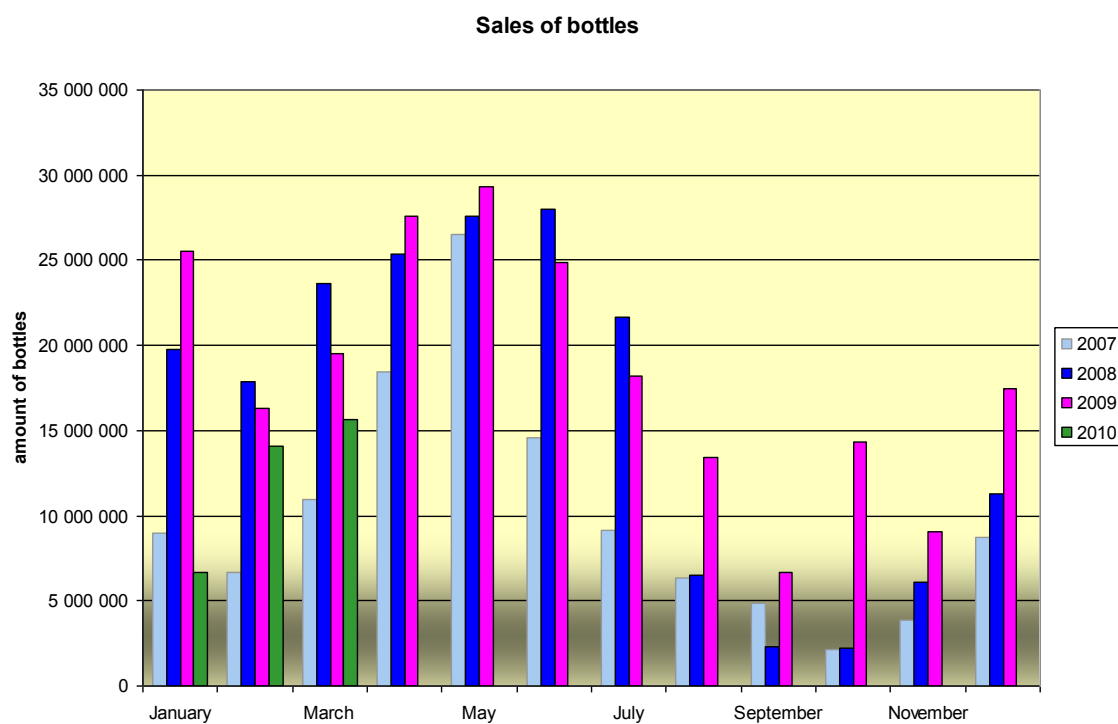
## **2.2 Výrobní portfolio**

Výrobní portfolio tvoří preformy (předlisky), které slouží jako polotovar k samotné výrobě Ref.PET lahví. Jsou vyráběny v různých gramážích (45 - 105 g) dle požadovaného produktu a po zhruba týdenní temperaci i ustálení mechanicko-

fyzikálních vlastností jsou vyfukovány na lahve. Ty se samozřejmě liší objemem (0,3 až 1,5 litru) a designem (dle požadavků zákazníka) atd.



Obrázek 2 – Ukázka produktů z výrobního sortimentu



Graf 1 – Prodeje lahví od roku 2007 do 2010

## 2.3 Podniková kultura vymezení podniku



Schéma 1 – Schéma zařazení v podnikové (globální) struktuře

Na základě podnikové kultury celého koncernu společností byl stanoven závod v Aši jako výrobní jednotka, která bude využívat nástroje „štíhlého podnikání“ a tím se stane hospodárnější a efektivnější. V klasifikaci hospodárnosti hraje roli několik nástrojů a přístupů, které musí být striktně dodržovány, aby přinesly očekávaný užitek.

Tyto nástroje jsou uvedeny níže, speciálně bych se chtěl jen ve zkratce věnovat jednomu – Six Sigmě.



Schéma 2 – Ukazatele Lean Enterprise

### 2.3.1 Six sigma

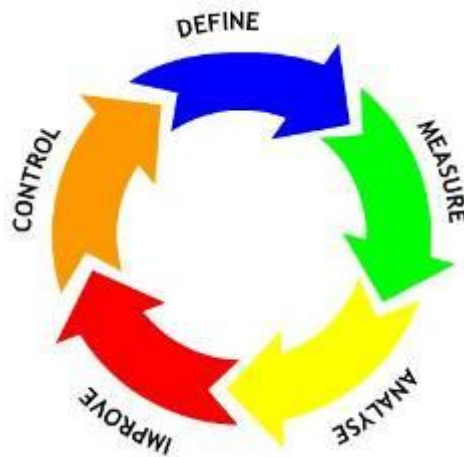
Pojem Six Sigma má tři významy – může znamenat:

- Manažerskou filosofii, založenou na principu neustálého zlepšování, využívající procesního řízení a prosazující rozhodování na základě naměřených dat.
- Strukturovaný a vysoce kvantitativně založený přístup ke zlepšování kvality produktů a procesů prostřednictvím týmové práce.
- Dosaženou úroveň kvality produktu nebo procesu, kdy na jeden milion příležitostí připadá maximálně 3,4 chyb.

### 2.3.2 Koncept DMAIC

Základním prostředkem zlepšování v iniciativě Six Sigma jsou projekty. Počet souběžně probíhajících projektů v podniku dává představu o šířce implementace Six Sigma.

Six Sigma má pro zlepšování procesů pevnou, strukturovanou a přísně logickou metodu (koncept), nazývanou DMAIC.



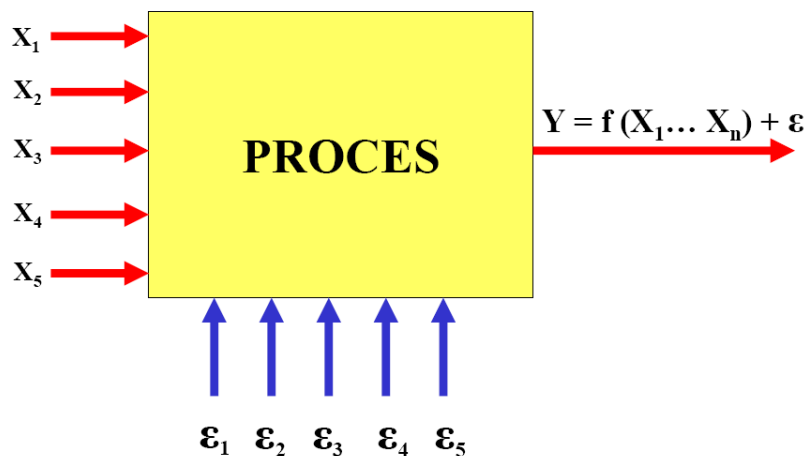
Obrázek 3 – DMAIC matice

### 2.3.3 Etapa Define

Prvním krokem v této etapě je definovat účel a rozsah projektu. Abychom získali informace o procesu a jeho „zákaznících“, je nutné provést ekonomickou analýzu přínosů a nákladů a vytvořit tým Six Sigma.

Na konci etapy jsou očekávány tyto výstupy:

- Zřetelně formulovaný cíl projektu včetně ekonomického zdůvodnění.
- Sestavený tým, pověřený příslušným nadřízeným (sponzorem) projektu.
- Pojmenování vstupů procesu (označení X) a výstupů (označení Y).



Obrázek 4 – Schéma procesu dle 6 Sigma

- Rozpočet.

### 2.3.4 Etapa Measure

Cílem této etapy je popsat a změřit současný stav. Zároveň je třeba ověřit, jestli metoda měření je vhodná pro analýzu procesu. Konkrétním výstupem druhé etapy je:

- Zpřesnění cíle projektu na základě dat.
- Soubor dat, která popisují současný stav a jeho proměnlivost.
- Ověření měřicí metody

### 2.3.5 Etapa Analyse

Třetí krok vede k nalezení a pomocí naměřených údajů prokázání příčiny současného stavu. Výstupem třetího kroku tedy je:

- Popis vztahu mezi vstupy procesu a jeho výstupem.
- Model procesu (například v podobě matematického vztahu  $Y = f(X_1, X_2, \dots)$ )
- Ověření vztahu příčina – následek.

### 2.3.6 Etapa Improve

Cílem etapy Improve je najít, ověřit a realizovat řešení problému. Dobré řešení je takové, které směřuje k potlačení hlavních příčin problému a které je plně realizovatelné. Výstupem je:

- Volba konkrétního řešení problému.
- Popis řešení.
- Plán realizace.
- Ověření (experiment).
- Vlastní realizace.

### 2.3.7 Etapa Control

V této etapě je řešení již realizováno a naším úkolem je tedy změřit jeho účinnost. Stejnou metodou, jakou jsme měřili ve druhé etapě, měříme nový stav a provedeme srovnání. Pokud je zlepšení skutečně účinné a přínosné, chceme jej zachovat a ochránit proti setrvačnosti v chování lidí i postupné erozi, která je v podnikovém prostředí běžná.



Nové řešení se musí zdokumentovat a všechny zúčastněné strany je potřeba informovat, proškolit a motivovat. U mnoha procesů chceme nový stav průběžně monitorovat. Nezanedbatelnou součástí pátého kroku je:

- Srovnání stavu před a po realizaci na základě naměřených dat.
- Dokumentace nového stavu.
- Proškolení a informování zúčastněných.
- Plán kontrol, plán zásahu v nestandardních situacích.
- Monitorovací systém.
- Doporučení pro další zlepšování.
- Prezentace výsledků.

## 2.4 Využití nástrojů Six Sigmy

V níže uvedeném schématu jsou uvedeny některé z možných nástrojů Six Sigmy. Jednotlivé nástroje se od sebe liší, a to nejen svou vypovídací schopností, vhodností použití, ale hlavně načasováním použití, tj. v jaké etapě projektu se nacházím. Od tohoto je odvozena vhodnost použití nespočetného množství nástrojů, které lze v přístupu Six Sigma realizovat.



Schéma 3 – Nástroje Six Sigma

### 3 PLASTY GLOBÁLNĚ

Plasty, známé také pod názvem plastické hmoty, plastické trhaviny nebo pod nesprávným názvem „umělé hmoty“, označují řadu syntetických nebo polosyntetických polymerních materiálů. Často obsahují další látky, které zlepšují jejich užité vlastnosti, např. odolnost proti stárnutí, zvýšení houževnatosti, pružnost apod. Plasty mohou být formovány do předmětů, filmů nebo vláken a právě tato schopnost tvarování, plasticita jim dala název. Vyznačují se velkou variabilitou vlastností, jako je např. tepelná odolnost, tvrdost, pružnost, atd. Mezi jejich výhody patří nízká hustota, chemická odolnost, jednotnost složení i struktury a zejména dobrá zpracovatelnost energeticky málo náročnými technologiemi vhodnými pro masovou výrobu (lisování, lisostřík, vstřikování, vyfukování, lití) apod. Díky těmto vlastnostem bývají plasty velmi často využívány téměř ve všech průmyslových odvětvích i v domácnostech. Slovo plastický tak získává širší význam a může charakterizovat materiál, který je typický určitým chováním při deformaci pod smykovým napětím.

Při dělení plastů bývá nejčastěji sledováno hledisko použitého monomeru, tedy chemického složení jejich polymerního řetězce. Pak hovoříme o vinylových plastech (polyethylen, polypropylen, polyvinylchlorid, polystyren, polymethylmethakrylát), polyamidech, polyesterech, polyurethanech, fenoplastech, aminoplastech, polysiloxanech (silikony), fluoroplastech (Teflon) a další.

Jeden z dalších způsobů dělení plastů může být např.:

- termoplasty (po ohřátí na vysokou teplotu a ochlazení jsou znovu zpracovatelné) - reaktoplasty (dříve termosety) po ohřátí je již nelze zpracovat.
- polymer vznikl řetězovou polymerizací - polymer vznikl stupňovitou polymerizací
- podle teploty skelného přechodu, značka  $T_g$  ( $T_g$ , glass = sklo), tedy teploty, kdy polymer přechází ze stavu skelného do stavu kaučukovitého.
- plně syntetické (velká většina plastů) - polosyntetické (vznikající modifikací přírodních polymerů, např. celulózy (nitrocelulóza, acetát celulózy, viskóza)).

### 3.1 Klasifikace plastů

Klasifikace plastů je možná z několika hledisek:

1. Podle aplikace a podle konstrukční složitosti vyráběných dílů, lze plasty rozdělit do následujících skupin:

- plasty pro široké použití, mezi které patří polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF)
- plasty pro inženýrské aplikace, kam lze zařadit polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylen (POM), polymetylmetakrylát (PMMA), terpolymer ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice
- plasty pro špičkové aplikace, do kterých lze zařadit polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), polytetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI) a další.

2. Na základě teplotního chování, podle působení teploty na:

- termoplasty - jedná se o polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, do stavu vysoce viskózních neneutronovských kapalin, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání  $T_m$  (semikrystalické plasty), resp. teplotu viskózního toku  $T_f$  (amorfní plasty). Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Jedná se pouze o fyzikální proces. K termoplastům patří většina zpracovávaných hmot, jako je polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atd.
- reaktoplasty - jedná se o polymerní materiály, dříve nazývané termosety, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, k tzv. vytvrzování. Výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu. Ochlazování reaktoplastů probíhá mimo nástroj, neboť zajištění

rychlého ohřevu formy pro vytvrzení a následné rychlé ochlazení materiálu by bylo obtížné. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Patří sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, apod.

- kaučuky, pryže a elastomery - jedná se o polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, probíhá tzv. vulkanizace. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj.

### 3. Podle nadmolekulární struktury (podle stupně uspořádanosti), kdy nadmolekulární struktura je nadřazena makromolekulám, se plasty dělí:

- amorfní plasty, kde makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Patří sem např. PS, PMMA, PC, apod. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou vzhledem k nízkému indexu lomu (1,4 až 1,6) průhledné, resp. dle propustnosti světla čiré (92 % propustnosti světla), transparentní anebo průhledné (60 % propustnosti světla). Součinitel teplotní roztažnosti je menší, než u semikrystalických polymerů. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesílnění  $T_g$ .
- krystalické (semikrystalické) plasty, které vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 do 90 %) a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními. Nemůže nikdy dosáhnout 100 %, proto se krystalické plasty označují jako semikrystalické. Patří sem PE, PP, PA, PTFE, POM, atd. Jsou mléčně zakalené, index lomu je větší a jsou charakterizovány houževnatostí materiálu, pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Použitelnost semikrystalických plastů je do teploty tání  $T_m$ .

#### 4. Podle druhu přísad:

- neplněné plasty - neplněný plast je takový plast, u kterého množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice.
- plněné plasty – plnivo ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti plastu. Makromolekulární látka plní funkci pojiva a určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti hmoty. Přísadou mohou být plniva, stabilizátory, maziva, barviva, změkčovadla, iniciátory, nadouvadla, tvrdidla, retardéry hoření, apod.

Plniva zlepšují buď mechanické vlastnosti materiálu, nebo chemickou odolnost či tvarovou stálost při zvýšené teplotě, jiné prostě jen hmotu zlevňují. Rozeznáváme vyztužující (skleněná, uhlíková, kovová či méně účinná bavlněná krátká nebo dlouhá vlákna, popř. textilní ústřížky do obsahu maximálně 50 %, neboť pro správnou funkci vyztužujícího plniva je důležité, aby bylo dokonale obaleno pojivem) a nevyztužující plniva ve formě prášku, které se přidávají se většinou z důvodu snížení ceny materiálu (moučka z břidlice, kaolinu, křídý a dalších levných materiálů).

Jiná plniva (např. grafit) zlepšují kluzné vlastnosti, práškové kovy zlepšují tepelnou vodivost. Přídavkem sazí (zejména u polyolefínů) se zvyšuje odolnost proti UV záření, atd. Obsah nevyztužujících plniv bývá až 70 %. Zvláštním typem plniva jsou skleněné nebo kovové kuličky, které zvyšují rozměrovou stabilitu a odolnost proti rázům, resp. vodivost. Stabilizátory (tepelné, světelné) jsou určeny k zpomalení degradačních procesů a zvýšení životnosti součástí. Maziva (obsah do 1 %) usnadňují zpracování polymerů např. tím, že snižují viskozitu polymeru nebo zabraňují lepení výrobku na stěnu formy. Mohou to být např. vosky, stearáty Zn či Ca, popřípadě méně používané oleje a tuky. Barviva (obsah do 10 %) dávají plastům požadovaný barevný odstín. Většinou se používají barevné pigmenty založené na anorganických sloučeninách kovů (oxidy železa popř. chromu). Organická barviva (lihové roztoky) rozpustná v polymeru se použijí tehdy, má-li hmota po vybarvení zůstat průhledná. Změkčovadla zlepšují houževnatost, zpracovatelnost a ohebnost materiálu, ovšem na úkor mechanických vlastností. Tvrdidla způsobují vznik příčných vazeb mezi makromolekulami a tím vytvrzení. Iniciátory a urychlovače polyreakcí ovlivňují účinek tvrdidla. Retardéry hoření působí samozhášivě, zpomalují proces hoření plastů nebo vůbec nedovolí zapálení

plastu. Nadouvadla jsou přidávána v malém množství (0,5-2 %) k základnímu materiálu a po zahřátí na zpracovatelskou teplotu se rozkládají v plynné látky, vytvářející lehčené plasty.

#### 5. Podle polarity:

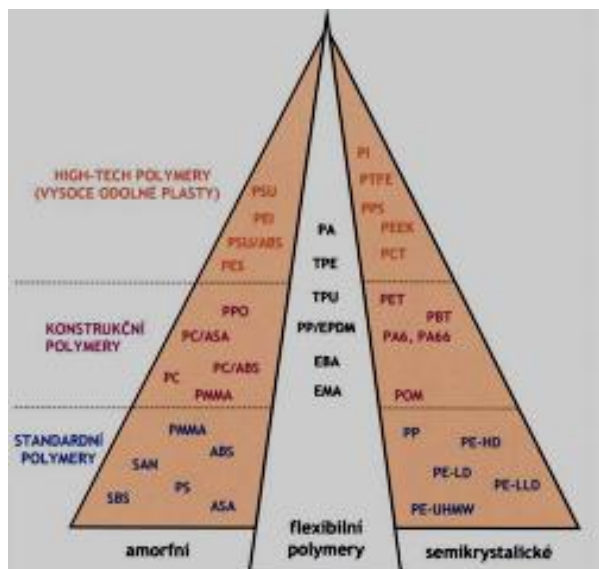
- polární plasty – mají trvalý dipól a mezi polární plasty patří PA, některé pryskyřice, apod.
- nepolární plasty – nemají trvalý dipól a patří sem PE, PP, PS, apod.

#### 6. Podle chemické struktury

Chemická struktura plastů souvisí s jejich chemickým názvem, a tak zde hovoříme o polyolefínech, styrenových plastech, polyamidech aj.

#### 7. Podle původu (zastaralé dělení, neboť nepostihuje plasty výstižným způsobem) se polymery dělí:

- přírodní – jsou založeny na přírodních makromolekulárních látkách, např. na bázi celulózy, latexu, kaseinu, atd.
- syntetické – k výrobě je použita chemická cesta



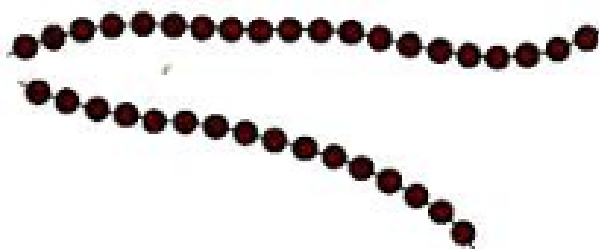
Obrázek 5 – Rozdělení polymerů dle aplikace a jejich nadmolekulární struktury

## 3.2 Struktura plastů

Obecně označujeme plasty jako makromolekulární látky o molekulové hmotnosti vyšší než 104. Z chemického hlediska jsou to látky organické. Podstatu polymerů tvoří makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu, která je tvárná za působení teploty  $T$  a tlaku  $p$ , v jejichž makromolekule se jako článek řetězu mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Základním prvkem řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet dlouhé řetězce.

V zásadě existují tři druhy polymerních makromolekul: lineární, rozvětvené (typické pro termoplasty) a zesíťované (kaučuky, reaktoplasty):

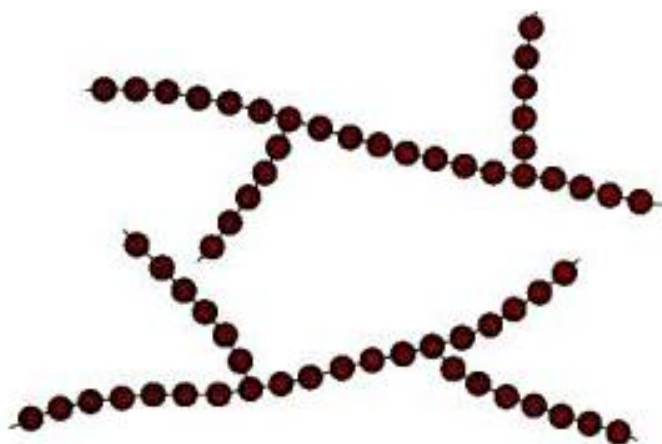
- lineární makromolekuly vznikají řazením monomerních molekul vedle sebe „jako korálky na šňůře perel“. Lineární makromolekuly se mohou z prostorových důvodů více přiblížit jedna ke druhé a vyplnit tak kompaktnější prostor. Polymery potom mají vyšší hustotu (např. vysokohustotní polyethylen HDPE). Lineární makromolekuly také snáze vytvářejí prostorově pravidelné shluky krystalických struktur a tyto polymery pak mají vyšší obsah krystalických podílů. Plasty s lineárními makromolekulami jsou obvykle dobře rozpustné a tavitelné (dobrá pohyblivost makromolekul), v tuhém stavu se vyznačují houževnatostí a ve formě tavenin dobrou zpracovatelností.



Obrázek 6 – Lineární makromolekuly

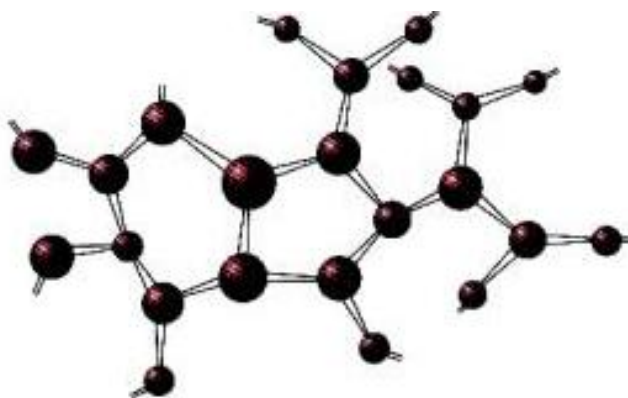
- rozvětvené makromolekuly se vyznačují tím, že mají na základním řetězci boční větve („přívěsek na šňůře perel“). Rozvětvené makromolekuly se na rozdíl od

lineárních makromolekul nemohou v důsledku bočních větví jedna ke druhé dostatečně přiblížit. Proto se vyznačují nižší hodnotou hustoty (např. nízkohustotní polyethylen LDPE). Uspořádanost jejich shluků je nízká a tudíž hůře krystalizují a mají nižší stupeň krystalinity. Rozvětvení zhoršuje i pohyblivost makromolekul a tedy i tekutost v roztaveném stavu. Boční řetězce, které způsobují oddálení sousedních makromolekul, mají za následek pokles mezimolekulárních sil a tím zhoršení většiny mechanických vlastností.



Obrázek 7 – Rozvětvená makromolekula

- zesíťované makromolekuly - v tomto případě je několik přímých nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců mezi sebou propojeno vazbami, takže vytvářejí jednu takřka nekonečnou makromolekulu - prostorovou síť. Takováto síť vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Polymery vykazují vysokou tvrdost, tuhost a odolnost proti zvýšené teplotě, avšak nízkou odolnost proti rázovému namáhání. Sítě mohou být řídké (charakteristické pro elastomerní kaučukovité polymery) nebo husté (reaktoplasty).



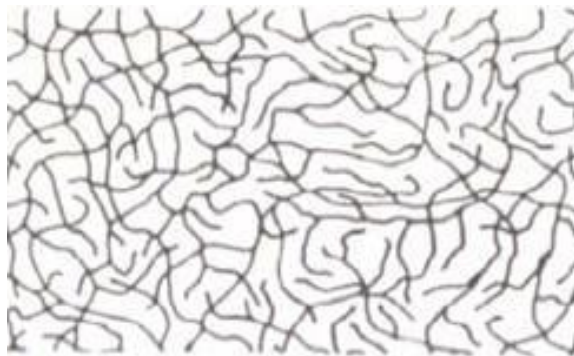
Obrázek 8 – Zesíťovaná makromolekula



### 3.2.1 Morfologie plastů

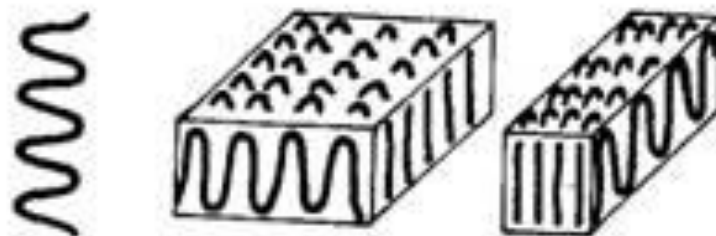
Nadmolekulární struktura (stupeň uspořádanosti makromolekul) může být popsána jednak jako amorfní a jednak jako krystalická. Lineární makromolekuly vytváří, narozdíl od rozvětvených makromolekul, uspořádanější nadmolekulární strukturu a zesíťované makromolekuly strukturu neuspořádanou. Termoplasty tak mohou mít amorfní nebo semikrystalickou nadmolekulární strukturu, zatímco reaktoplasty pouze strukturu amorfní.

- amorfní strukturou rozumíme strukturu bez jakékoliv uspořádanosti (struktura chaotická). Základním morfologickým útvarem této struktury jsou globuly (neboli klubíčka) o velikosti 10-30 nm, které jsou vytvořeny z chaoticky stočených makromolekul.



Obrázek 9 – Amorfní termoplast

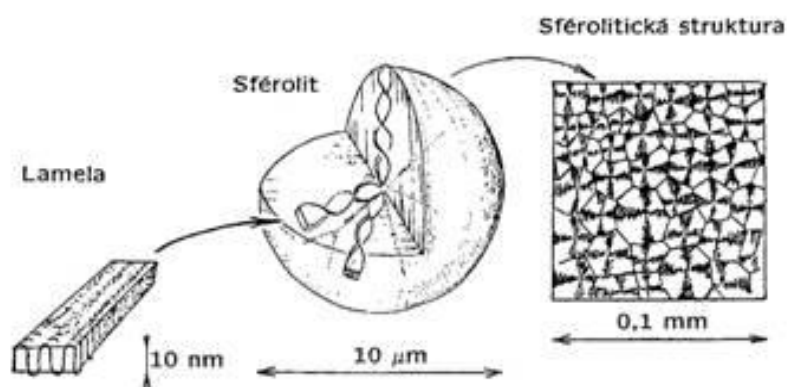
- krystalická struktura se vyznačuje určitým stupněm uspořádanosti. Základním morfologickým útvarem jsou tzv. lamely, fibrily.



Obrázek 10 – Nadmolekulární struktura krystalických plastů

a) proužek, b) lamela, c) fibrila

U reálných výrobků se při tuhnutí z tavenin polymerů vytvářejí útvary, nazývané sférolity. Jedná se o shluky lamel, které vychází ze společného centra a rozrůstají se na všechny strany, často jsou vrtulovitě stočené. Krystalizující polymery nemají v reálných podmínkách technologického zpracování možnost dokonalé krystalizace, tzn., že krystalizace se nezúčastní veškerá polymerní hmota, ale krystalizuje jen určité procento polymeru. Část takového polymeru je krystalická, zbylá část zůstává v amorfním stavu. Hovoříme proto o tzv. semikrystalických polymerech. Míru uspořádanosti ve struktuře vyjadřujeme tzv. stupněm krystalinity. Stupeň krystalinity tedy udává relativní podíl krystalických oblastí ve hmotě. Pro vznik semikrystalické struktury je nutná tvorba krystalizačních zárodků (tzv. nukleace), na nichž teprve poté rostou krystality. K nukleaci dochází při ochlazování taveniny, která má amorfní strukturu. Pod teplotou zesklňení  $T_g$  a nad teplotou tání  $T_m$  k nukleaci nedochází. Druhým důležitým faktorem, rozhodujícím o tvorbě krystalické fáze je doba, kterou má polymer k dispozici. Má-li se dosáhnout jemnozrné struktury, musí krystalizace probíhat při takové teplotě, kdy se tvoří velké množství zárodků. Má-li výrobek vykazovat co nejlepší mechanické vlastnosti, je nutno řídit krystalizaci tak, aby bylo dosaženo nejen co nejvyššího stupně krystalinity, ale také současně jemnozrné struktury. Prudké ochlazení povrchu budoucího výrobku způsobí, že polymer sice zkrystalizuje, ale nevytvoří sférolitickou strukturu.



Obrázek 11 – Sférolitická struktura semikrystalických termoplastů

Hlavní prvky nadmolekulární struktury se utvářejí v průběhu chladnutí výrobku a to ať ve formě nebo mimo ni. Je-li krystalizace spojena s přeměnou fáze (polymer přechází ze stavu kapalného do tuhého), hovoříme o tzv. primární krystalizaci. Ta však

může pokračovat ještě ve stavu tuhém (často i během několika měsíců) a přechází v sekundární krystalizaci. Jsou s ní spojeny nejen změny rozměrů, ale i vlastností výrobků, a je tudíž jevem nežádoucím. Podmínky tuhnutí nejsou ve všech částech výrobku stejné a krystalizace je nerovnoměrná. Z technologického hlediska vzniká nestejnorodý, anizotropní materiál. Polymer chladne nejprve u stěny formy. Naopak nejdéle chladne a zůstává v tekutém stavu uprostřed dutiny formy, tedy v jádru tělesa (u semikrystalických plastů je tak v jádru největší stupeň krystalinity, ve slupce tělesa naopak nejmenší). Tyto rozdílné podmínky vedou ke strukturnímu rozlišení mezi povrchem a jádrem tělesa. V krystalické oblasti polymerního materiálu bude mít materiál s vyšším stupněm krystalinity spíše lineární tvar makromolekuly, a tak vlivem těsnějšího uspořádání makromolekul v krystalických oblastech a vlivem vyšších mezimolekulárních sil se bude polymerní materiál s vyšším stupněm krystalinity projevovat vyšší hodnotou pevnosti, tuhosti a tvrdosti. Houževnatost tohoto materiálu poklesne. Například HDPE má stupeň krystalinity kolem 80 %, zatímco LDPE kolem 60 %. Amorfni oblast polymerního materiálu představuje jakési klouby, kolem nichž se mohou krystality natáčet, takže přispívají ke zvýšení houževnatosti a tím i tažnosti. Z uvedeného je zřejmé, že vlastnosti polymerního materiálu budou závislé na tvaru makromolekuly a stupni krystalinity.

Orientace makromolekul na povrchu vstřikovaného dílce je vlivem vysokých vstřikovacích sil ve směru toku taveniny (hovoříme o tzv. orientační textuře), zatímco v jádru tělesa zůstávají molekuly déle v tekutém stavu a než ztuhnou, stačí se vrátit do neorientovaného stavu.

Jedním z důsledků krystalizace je ztráta průhlednosti materiálu. Vzhledem k tomu, že hustota amorfniho polymeru je menší než hustota polymeru semikrystalického, dochází při průchodu světla hmotou v důsledku různého indexu lomu k jeho rozptylu na drobných krystalických útvech uvnitř výrobku z plastu a semikrystalický plast se jeví jako mléčně zakalený, zatímco amorfni plast jako čirý, průhledný.

### 3.2.2 Monomer versus polymer

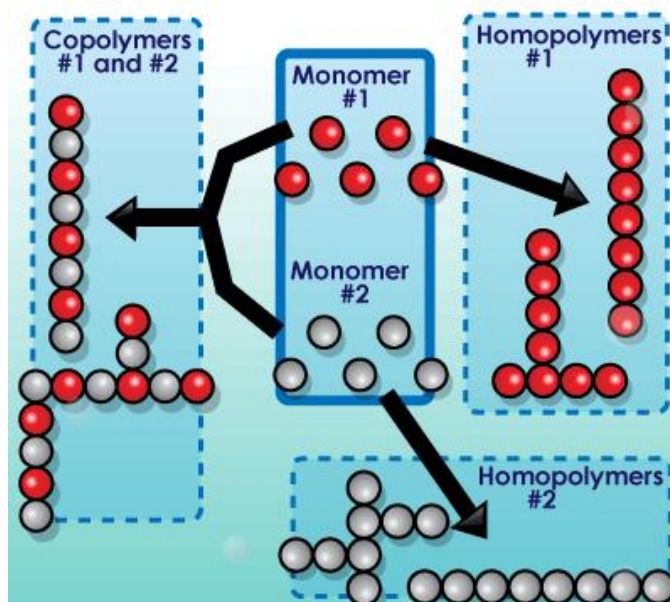
Monomer se používá jako výchozí látka při výrobě makromolekulárních látek, tzv. polymerů, kdy je zapotřebí, aby výchozí monomer (nízkomolekulární látka) v sobě obsahoval tzv. reaktivní skupinu a navíc byl minimálně dvoufunkční, může však být i troj-, čtyř- a vícefunkční.

Makromolekula je molekulový systém složený z velkého počtu atomů vázaných chemickými vazbami do dlouhých řetězců. Tyto řetězce tvoří pravidelně se opakující se části, které jsou stavební jednotkou polymeru.

Polymer je látka tvořena makromolekulami, které jsou složené z opakujících se strukturálních jednotek obvykle spojených kovalentní chemickou vazbou.

Přestože jsou makromolekuly jedním z nejrozšířenějších druhů organických látek v přírodě, větší pozornost jim byla věnována až po první světové válce. Poté, jakmile byly zjištěny jejich výborné vlastnosti i možnost praktického využití, šel jejich vědecký a technický vývoj velmi rychle kupředu.

Molekuly polymerů, jak plyne z jejich názvu, se skládají z velkého množství základních stavebních kamenů, zvaných monomery. Příklad polymerů, tvořených z různých monomerů.



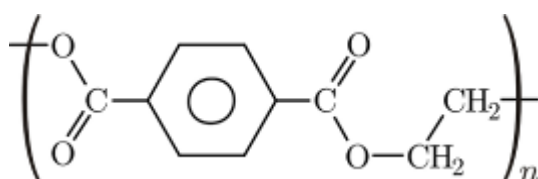
Obrázek 12 – Ukázka mono- a polymeru

## 4 PET MATERIÁL

Polyethylentereftalát je termoplastický polymer pryskyřice z rodiny polyesterů, známý pod zkratkou PET. PET není využíván pouze v textilním průmyslu, ale je hojně používán jako obalový materiál pro nápoje, potraviny. Je vhodný i pro různé kompozitní materiály (často se skleněnými vlákny).

PET se uplatnil především při výrobě vláken, které vynikají nemačkovostí a malou navlhavostí (např. Dacron; na textilních výrobcích můžeme najít nesprávnou zkratku PES, která označuje příslušnost tohoto polymeru k polyesterům), lahví (obvykle označovaných jen zkratkou PET) a dalších obalů a fólií. Tenké fólie jsou často používány pod obchodním názvem Mylar, Terylene, Trevira atd.

V závislosti na procesu výroby a zpracování (rychlosti chladnutí taveniny) je možno připravit téměř amorfní PET (průhledný) a polokrystalický PET (mléčně zakalený). Připravuje se polykondenzační reakcí (esterifikací) ethylenglykolu s kyselinou tereftalovou.



PET	
Molecular formula	(C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>
Density amorphous	1370 kg/m <sup>3</sup>
Density crystalline	1455 kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus(E)	2800–3100 MPa
Tensile strength(σ <sub>t</sub> )	55–75 MPa
Elastic limit	50–150%
notch test	3.6 kJ/m <sup>2</sup>
Glass temperature	75 °C
melting point	260 °C
Vicat B	170 °C
Thermal conductivity	0.24 W/(m·K)
linear expansion coefficient (α)	7×10 <sup>-5</sup> /K
Specific heat (c)	1.0 kJ/(kg·K)
Water absorption (ASTM)	0.16
Refractive Index	1.5750
Price	0.5–1.25 €/kg
source: A.K. van der Vegt & L.E. Goovaert, Polymeren, van kelen tot kunstof, ISBN 90-407-2388-5	

Obrázek 13 – Strukturální vzorec PET + základní info

PET se poměrně dobře mechanicky recykluje, přičemž významná je čistota vyseparovaného odpadního plastu. Probíhá také intenzivní výzkum chemické recyklace PET, a to i v České republice, kde se chystá patent pro tuto technologii. Spotřebitelské aplikace se pro potřeby pozdějšího třídění a recyklace označují jedničkou uprostřed trojúhelníku ze zacyklených šipek.

Při degradaci PET se uvolňuje acetaldehyd, který svým nasládlým zápachem může znehodnotit obsah PET lahví. Do nápojů se také může uvolňovat oxid antimonitý, který se používá při výrobě PET jako katalyzátor.

## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této diplomové práce navazuje na teorii první části a zároveň reaguje na aktuální problém společnosti. Kolem roku 2008 začalo oddělení kvality upozorňovat na snižující se kvalitu vyráběných produktů, na zvýšený výskyt praskavosti, který celou svou práci zcela podřídil jedinému zájmu, a to co nejrychleji a hlavně nejkvalitněji odstranit zvýšenou praskavost Ref.PET lahví.

Cílem této diplomové práce je zmapovat příčiny vzniku prasklin a nastínit systém práce celého našeho týmu při řešení tohoto problému pomocí nejrůznějších metod. Na počátku byly stanoveny hypotézy, metody, které by dokazovaly daná tvrzení.

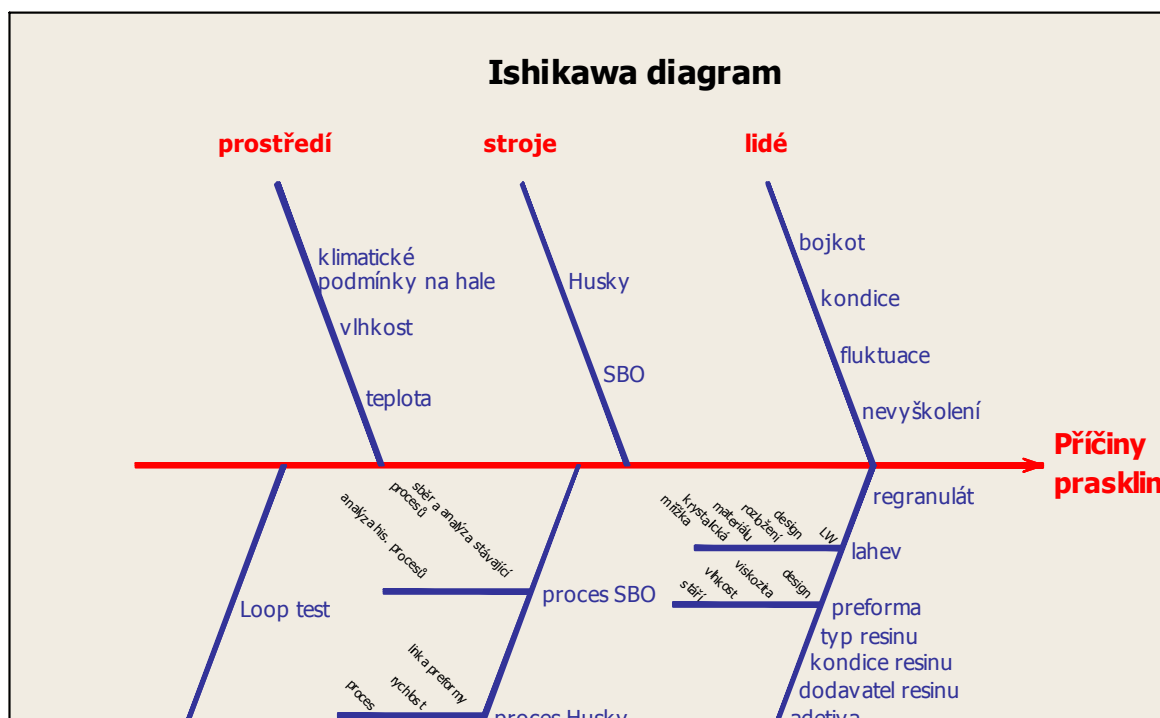
### 5.1 Prvotní hypotézy a metody

Teoretická část diplomové práce nabízí přehled plastů, jejich vlastností a tato fakta spolu s praktickými zkušenostmi a pracovním procesem se stala východiskem pro stanovení jednotlivých hypotéz praktické části mapující příčiny prasklin.

1. Lidský faktor – Na praskliny má vliv obsluha stroje, kontrolorka kvality, neboť chybí řádné proškolení související i s vysokou fluktuací pracovníků.
2. Vliv stroje a zařízení – Praskliny se objevují na všech strojích, bez ohledu na to, jaký byl zrovna použit.
3. Vliv prostředí – Na vznik prasklin má vliv klimatické prostředí ve výrobní hale - teplotní přechody a převozy z externích a interních skladů, vlhkost a teplota okolí.

Zvýšený výskyt prasklin u PET vratných lahví byl řešen přístupem Six Sigma, manažerskou filozofií firmy, strukturovaným a vysoce kvantitativně založeným přístupem vedoucím ke zlepšování kvality produktů a procesů prostřednictvím týmové práce. Byl definován účel a rozsah projektu. Cílem se stalo odstranění praskavosti stěny Ref.PET vratných lahví. Kromě ekonomické analýzy je z níže uvedeného Ishikawa diagramu zřejmé, že byly provedeny další analýzy a konkrétně pojmenovány oblasti, které se mohou po testech vyloučit jako rizikové a naopak které by se měly nadále

sledovat. A právě tento počáteční stav projektu, analýza příčin prasklin, vyřešil výše zmíněné hypotézy.

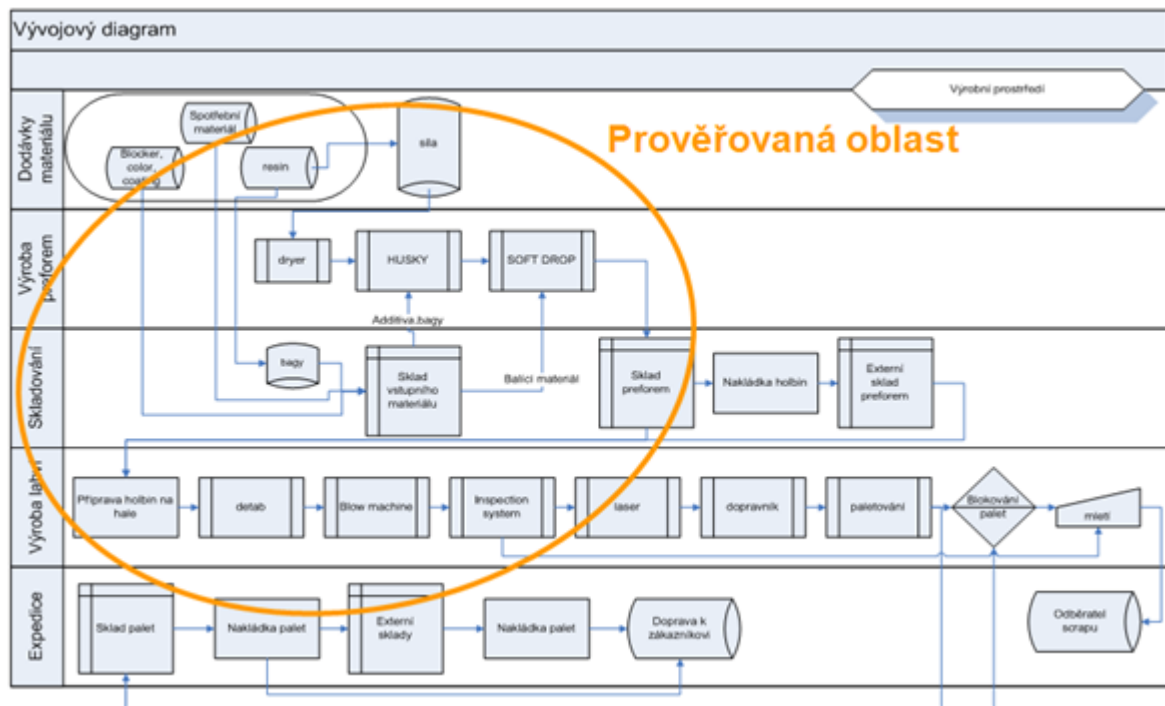


Graf 2 – Ishikawa diagram vytipovaných oblastí

Jednotlivé oblasti byly stanoveny na základě brainstormingu zákazníků prováděným oddělením výroby. Bylo uskutečněno několik meetingů, na kterých byly naplánovány další kroky projektu (experimenty), došlo i k seznamování s výsledky jednotlivých testů a vyvozování možných závěrů, které byly dále podrobeny analýze. V průběhu této činnosti byl sestaven i realizační tým: 1 člen vývojového oddělení, zástupce výrobního oddělení, technici zúčastňující se procesu vstřikování a vyfukování, zástupci zákaznického oddělení a oddělení kvality. Celý projekt zastřešoval autor této diplomové práce, a poradním orgánem v oblasti zpracovávání projektu se stal Mgr. Martin Hannsmann, Black Belt, což je v terminologii Six Sigma jakýsi poradní orgán dle organizační struktury Six Sigmy.



Přehlednou analýzu nabízí tzv. procesní mapa, která sleduje celý výrobní proces až k finálnímu výrobku.



V celém procesu hrají významnou roli lidé a právě tímto směrem se ubíraly první analýzy příčin prasklin. Sledovala se fluktuace lidí na pracovišti, jejich pravidelná proškolení, fyzická i psychická kondice, zda neselhala kontrola kvality výroby. Na meetincích se rozpoutala diskuse o možných chybách obsluhy vstřikovacích a vyfukovacích strojů, odmítl se i možný bojkot výroby. Konkrétním výstupem této analýzy bylo komplexní zamítnutí vlivu lidského faktoru. Byla tak vyvrácena první hypotéza této diplomové práce – Na praskliny má vliv obsluha stroje nebo kontrolorky kvality, neboť chybí řádné proškolení související s vysokou fluktuací pracovníků. Nepotvrdilo se, že by obsluha strojů nezvládala svoji činnost, fluktuací lidí je minimální a pracovníci i kontrolorky kvality jsou pravidelně a přísně proškolení. Defekt je fyzikální záležitostí.

Pro stanovení příčin prasklin bylo třeba provést analýzu současného strojového zařízení firmy.



Obrázek 14 – Vyfukovací stroj SÍDEL, vstřikovací stroj HUSKY

### **Strojový park společnosti**

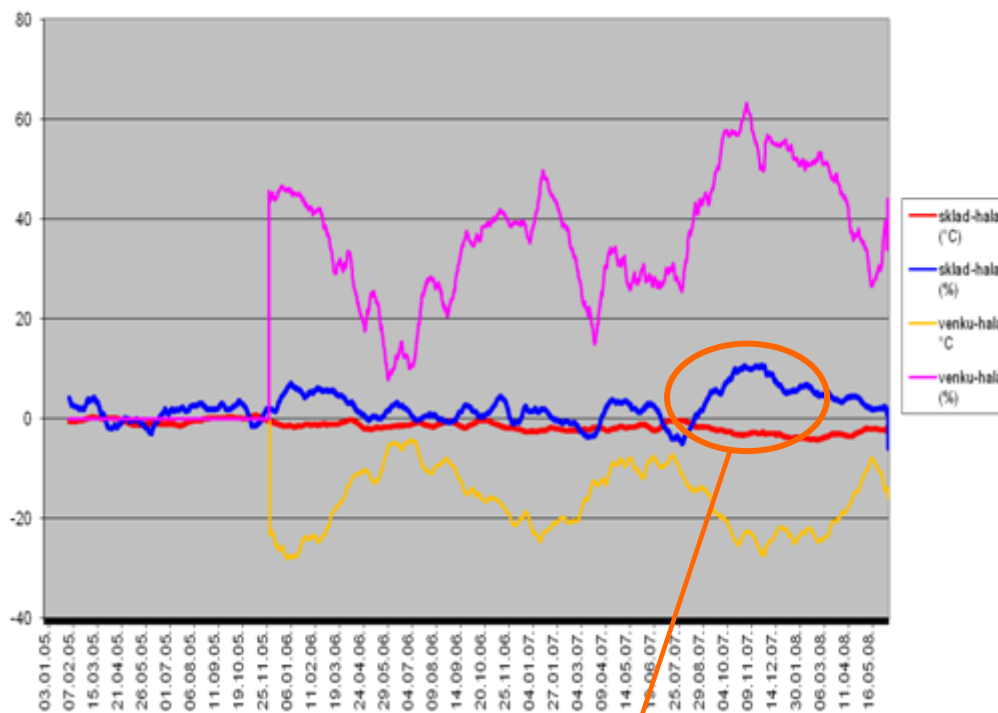
- od února 2004 byl strojový park:
  - 5x vstřikovací stroje HUSKY
  - 4x vyfukovací stroje SBO
- od září 2005 byl strojový park:
  - 4x vstřikovací stroje HUSKY
  - 4x vyfukovací stroje SBO
- od prosince 2007 byl strojový park:
  - 5x vstřikovací stroje HUSKY
  - 4x vyfukovací stroje SBO

Několikrát byl zopakován celý proces vstřikování a vyfukování na všech strojích Husky i SBO. Praskliny se objevovaly vždy bez ohledu na to, který ze strojů byl zrovna použit. Začaly se řešit otázky, zda je údržba strojů pravidelná, zda aktuální stav strojů nepotřebuje investici do rekonstrukcí. Analýzy potvrdily mou druhou hypotézu: Praskliny se objevují na všech strojích bez ohledu na to, jaký byl zrovna použit.

Při mapování současného stavu bylo zapotřebí vyloučit vliv prostředí na výskyt prasklin. Sledovaly se klimatické podmínky ve výrobní hale:

Prosinec-únor – analýza prostředí				
	2006	2007	2008	2009
Ø teplota	22 °C	23 °C	23 °C	23 °C
Ø rel. vlhkost	37 %	36 %	33 %	31 %

Tabulka 1 – Přehled klimatických podmínek ve výrobní hale



Graf 3 – Klimatické podmínky

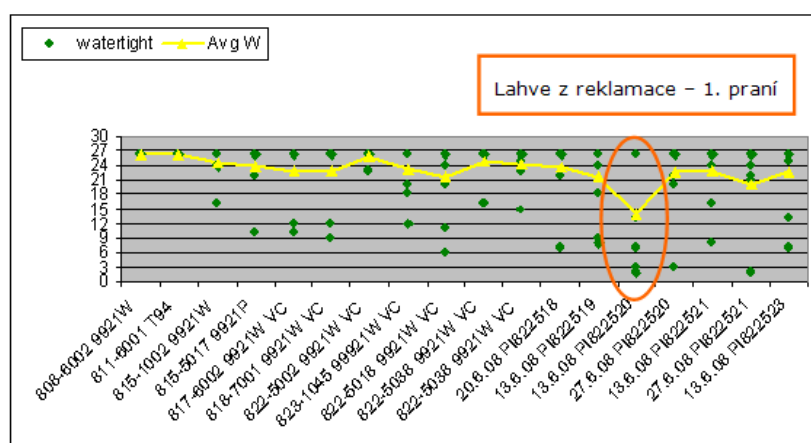


Graf 4 – Detail extrému

Tato analýza prokázala, že vliv prostředí je prakticky neovlivnitelný, a tak byl tento faktor zamítnut jako příčina prasklin a má třetí hypotéza byla vyvrácena: Na vznik prasklin má vliv klimatické prostředí ve výrobní hale - teplotní přechody a převozy z externích a interních skladů, vlhkost a teplota okolí.

## 5.2 Nástin průběhu celkové analýzy příčin prasklin

Celý projekt Six Sigma vznikl na základě zjištění, že u většiny sortimentu byl detekován defekt, který je pro náš produkt absolutně nepřijatelný, neboť způsobil ztrátu významného zákazníka. Lahve praskaly při prvním plnění ve stáčírně a náklady spojené s touto reklamací činily cca 2 500 000,- Kč. Společnost okamžitě reagovala. Autor se stal garantem celého projektu pro odhalení příčin praskání PET lahví v oblasti krku.



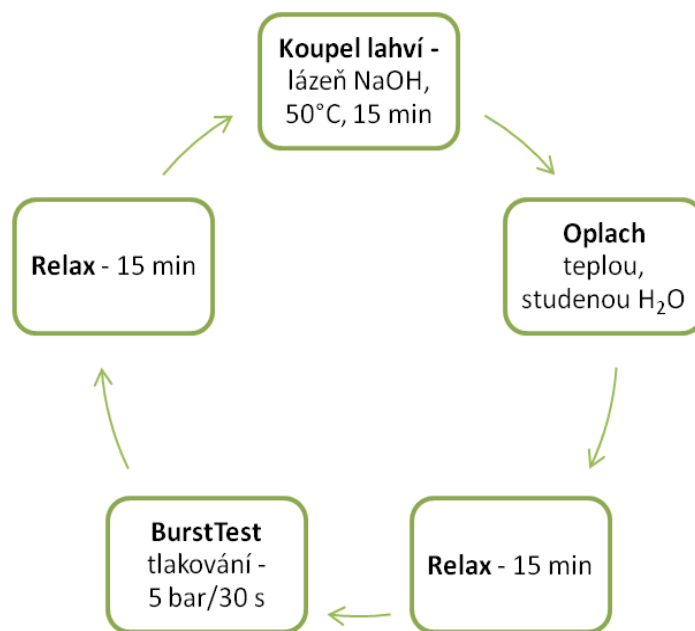
Graf 5 – Výsledek LoopTestu

### 5.2.1 LoopTest

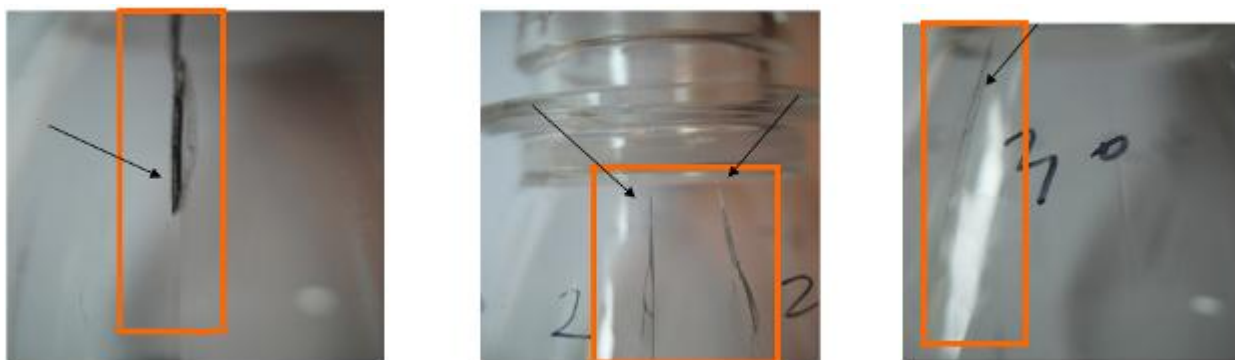
LoopTest je zkrácený Life cycle test, dlouhodobý test (cca 2,5 měsíce), na cca 24 hodin. Rozdílnost obou testů není jen v délce trvání, ale i v samotné realizaci. Life cycle test přináší louhovou lázeň, oplach, olejovou lázeň, tlakování, plnění a teplotní zátěž na 59°C. LoopTest je reálnější test prováděný u zákazníka na plnicí a mycí lince, neboť s sebou nese louhovou lázeň, oplach, tlakování a stabilizaci při pokojové teplotě.

Mechanické vlastnosti finálních produktů (lahví) se testují simulováním životního cyklu. Před, v průběhu a na konci testu jsou kontrolovány rozměry a vizuální defekty výrobku.

Samotný test životního cyklu simuluje plnění (tzn. tlakování), teplotní rozdíly prostředí a chemickou odolnost při čištění lahví. Vzhledem k tomu, že test trval 6 týdnů, byl vyvinutý efektivnější test, který je zaměřen na problematickou část výrobku – praskliny pod hrdlem. Podstata LoopTestu je popsána v níže uvedené schéma:



*Schéma 5 – Průběh laboratorního LoopTestu*



*Obrázek 15 – Defekt odhalen LoopTestem*

LoopTestem se prokázalo, že největší podíl výskytu prasklin je v dělicí lince lahve, dále pak v dělicí lince preforem a nejmenší podíl prasklin je mimo dělicí linky.

### 5.2.2 Externí testy a analýzy resinu

Bylo zapotřebí se na praskliny podívat detailněji, a tak byl požádán Ing. J. Kaiser, Ph.D., z katedry materiálů ZČU v Plzni o analýzu prasklin pomocí mikroskopického pozorování a spektrometru. Jak uvádí dílčí průběžná zpráva, která je součástí přílohy této diplomové práce, praskliny mají své zárodky v dělicích rovinách některých lahví po operaci vyfukování.

Potvrdila se tak hypotéza, že defekt se nachází v lahvi a ne v reformě, není tedy třeba nadále sledovat husky proces. Analýzy se tak začal ubírat směrem k procesu vyfukování, a to i vzhledem ke zpracovatelským vlastnostem PET-P. Teplota tání ( $T_g$ ) PET-P je  $75^{\circ}\text{C}$ , při ohřevu preformy v peci vyfukovací linky je teplota nad  $100^{\circ}\text{C}$ .

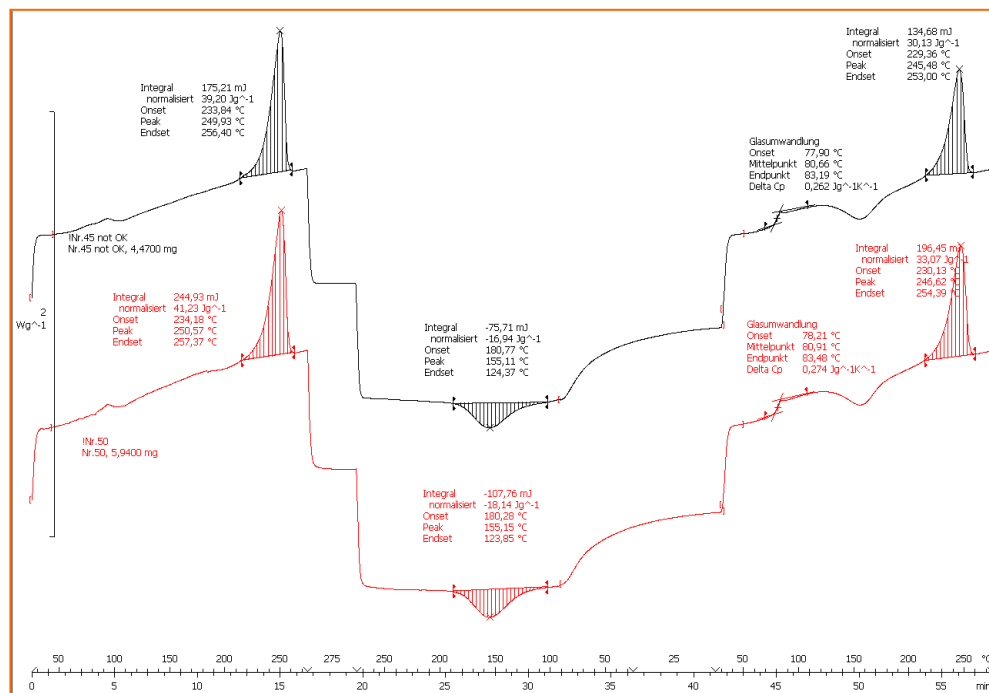


*Obrázek 16 – vstřikovací stroj HUSKY*

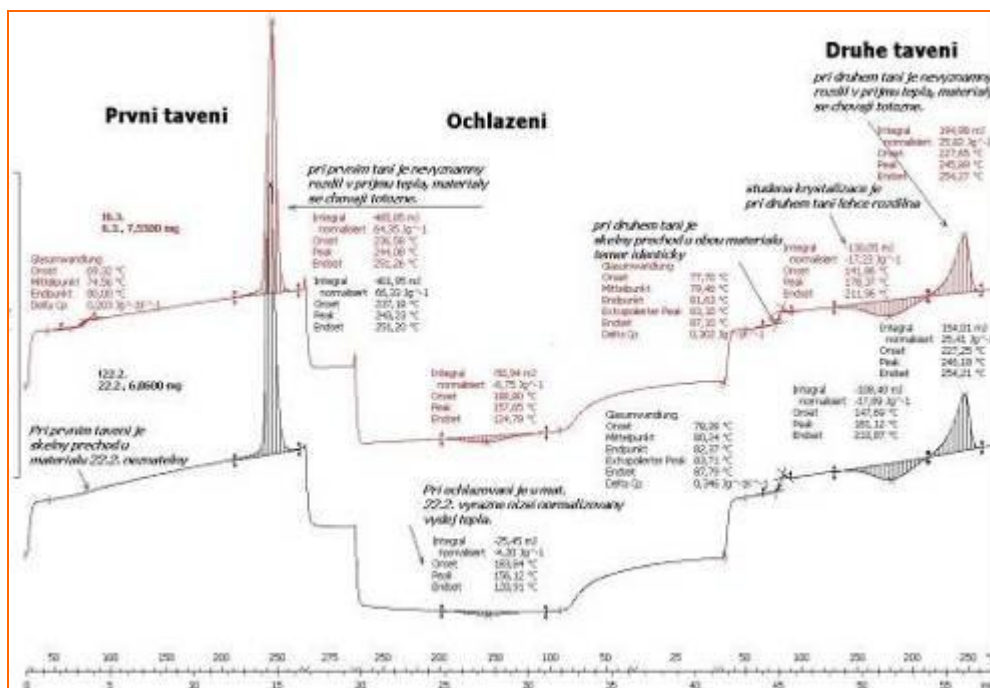
Vyfukovací proces je tak považován za nejúčinnější nástroj, jak lze výskyt defektu eliminovat.

Dříve bylo nutné provést další analýzy výrobního materiálu. O spolupráci byly požádány především dva externí subjekty, TRW Sleb - laboratoř firmy na výrobu

plastových dílů do automobilů, a Technická univerzita v Liberci. TRW Selb provádělo DCS měření analýzy - vzorky resinu (9921 W) z dodávek, ze kterých vzešla kritická, a nekritická výroba vzorky lahví (0,5L CCC LW) - kritická a nekritická výroba. Měřením byla vyslovena první hypotéza o tom, že v čistém materiálu 9921 W je přítomen regranulát. Jiné měření opět potvrdilo přítomnost regranulátu.



Graf 6 – DSC 0,5L CCC LW lahve



Graf 7 – DSC resinu (vstupního materiálu)

„v případě not OK materiálu by se mohlo jednat o přítomnost regranulátu, protože nižší teplota potřebná k zahřátí značí kratší řetězce, což se může stát právě výrobou regranulátu (jeho nasekání či semletí)“

„tento granulát by měl být teoreticky "mazlavější" a může způsobovat i vyšší křehkost“<sup>1</sup>

O podobné a doplňující analýzy se postarala Technická univerzita v Liberci. Byly provedeny měření:

#### ■ měření DCS:

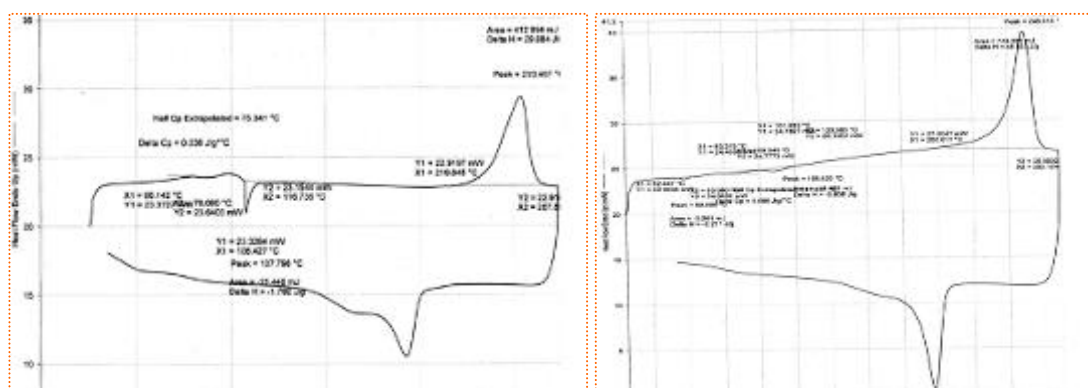
- vzorky resinu (9921 W) z dodávek, ze kterých vzešla **kritická** a **nekritická** výroba – v procesu
- vzorky lahví (0,5L CCC LW) - **kritická** a **nekritická** výroba

#### ■ měření MFI:

- vzorky resinu (9921 W) z dodávek, ze kterých vzešla **kritická** a **nekritická** výroba

<sup>1</sup> Citace k oficiální zprávě z laboratoře TRW, kterou vypracovala M. Mähnerová





Grafy 8 a 9 – DSC 0,5L CCC LW lahve , DSC resinu (vstupního materiálu)

Byla provedena tzv. kritická a nekritická výroba lahví 0,5L CCC LW. Výsledky přehledně nabízí níže uvedená tabulka.

Vzorek	Teplota zesklennění [°C]	Teplota tání [°C]	Poznámka
krit. výr.	75,34	253,49	„Studená krystalizace“ při teplotě 107,8.
nekrit. výr.	91,2	248,91	V blízkosti T <sub>g</sub> nevýrazné zvlnění křivky, vlna T <sub>g</sub> téměř neznatelná. Při teplotě 108,52 náznak studené krystalizace

Tabulka 2 – Hodnoty DSC z měření TUL

Zpráva TUL uvádí: „Rozdíly byly zjištěny z křivek DSC u teploty zesklennění a teploty tání materiálu, **mezi materiály byly shledány signifikantní rozdíly** rovněž v hmotnosti vzorků o stejné ploše a v tloušťce materiálu. Podle názoru řešitele jde o materiály s různou tepelnou historií, která se projevuje na křivkách z DSC, a po zpracování má za následek rovněž (při předpokladu stejných výrobních podmínek) různou hmotnost, tuhost a tloušťku stěny lahví.“<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Citace k oficiální zprávě z laboratoře TUL/FT/KTM, kterou vypracovala Ing. M. Maršálková

Kromě této analýzy měřili na TUL MFI, tedy tok taveniny. Podmínky měření:

Zkouška provedena dle normy ČSN EN ISO 1133

Teplota tavicí komory:	285 °C
Zatížení:	2,16 kg
Délka měření:	25 mm
Podmínky sušení:	160 °C/hod.

Výsledky měření kritické výroby:

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MVR [cm <sup>3</sup> /10 min]	37,83	37,69	38,01	38,62	39,10	39,22	39,28	39,37	39,40	39,47
<b>MVR = 38,80 ± 0,70 cm<sup>3</sup>/10 min</b>										

Tabulka 3 – Hodnoty MVR kritické výroby

Výsledky měření nekritické výroby:

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MVR [cm <sup>3</sup> /10 min]	48,04	48,14	48,96	49,67	50,52	50,53	50,51	50,50	50,56	50,95
<b>MVR = 49,84 ± 01,08 cm<sup>3</sup>/10 min</b>										

Tabulka 4 – Hodnoty MVR nekritické výroby

Celé měření nás dovedlo ke konstatování, že existují velké rozdíly v tekutosti (rozdílnosti) resinu. Ovšem stále nám chybělo něco hmatatelného.

### 5.2.3 Analýza resinu

Pro vstupní kontrolu vstupního materiálu se stalo rutinou provádět kvalitní kontrolu pomocí vlastního měřidla. Vlastním Viscometrem jsme měřili IV, parametr resinu. Byla nutná spolupráce s dodavateli vstupního materiálu, Invistou. Měřením se totiž zjistilo, že dodávka byla celá amorfní. Byla provedena reklamace resinu a dodavatel poslal novou dodávku resinu a zdarma, celkem 24 tun. Uznaná reklamace.

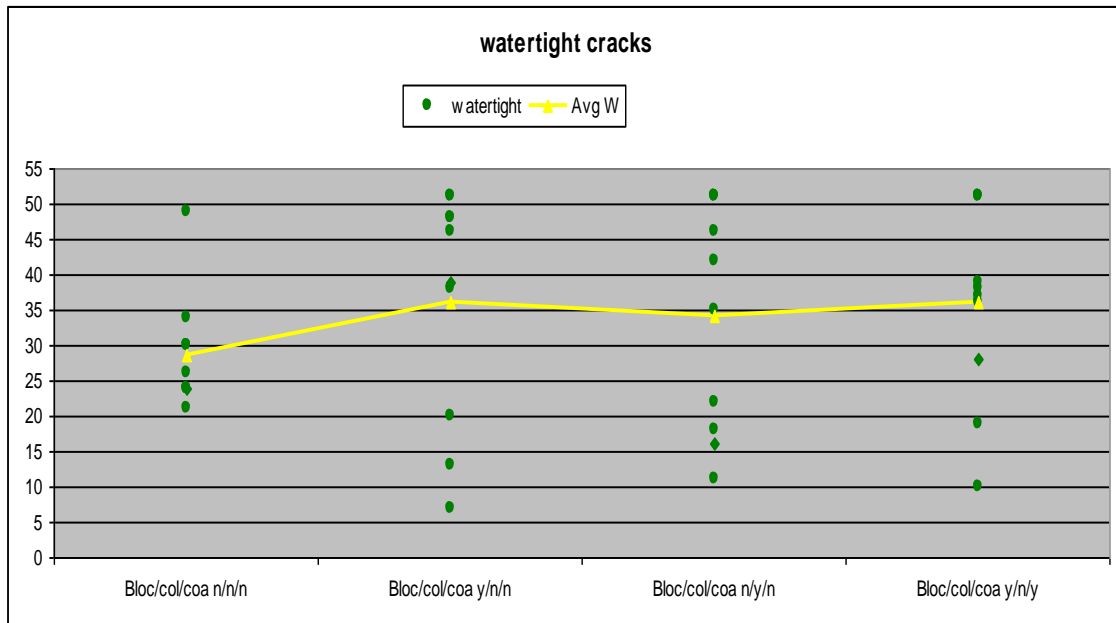
*Graf 10 – Vlastní měření IV*

*Graf 11 – Statisticky určené specifikace*

Pro určení specifikací byl využit regresní model, zjištěný díky spolupráci s dodavateli.

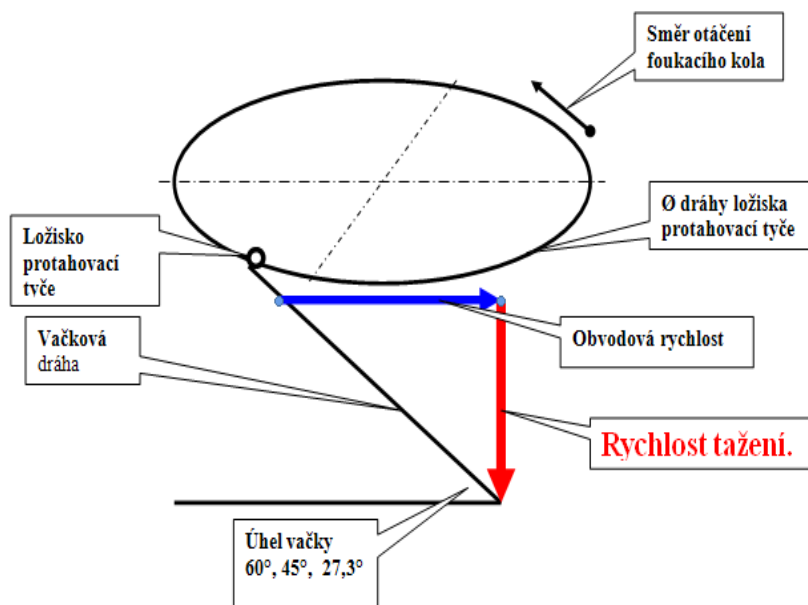
Dalším plánovaným krokem bylo testování preforem, a to test na přítomnost barvy, blockeru, přípravku na snižování AA, a coatingu. Chtěli jsme se zjistit, zda tato

aditiva mají vliv na praskliny na hrdle lahví. Standardními metodami, tedy LoopTestem, došlo k praskání všech měřených lahví. Vliv aditiv nebyl prokázán.



Graf 12 – Výsledky LoopTestu při kombinaci aditiv v preformě

Bylo nutné další testování. Pokoušeli jsme se ovlivnit rychlost streče – protahování.



Obrázek 17 – vyfukovací kolo u SIDEL stroje

Na foukací kolo je umístěna vačka s úhlem 45°. Tím se zvyšuje foukací rychlost. Chtěli jsme ovlivnit právě rychlost foukání, a tak jsme umístili vačku s úhlem 60°. Obvodová rychlost se vypočítá z:

$D = \varnothing$  dráhy ložiska

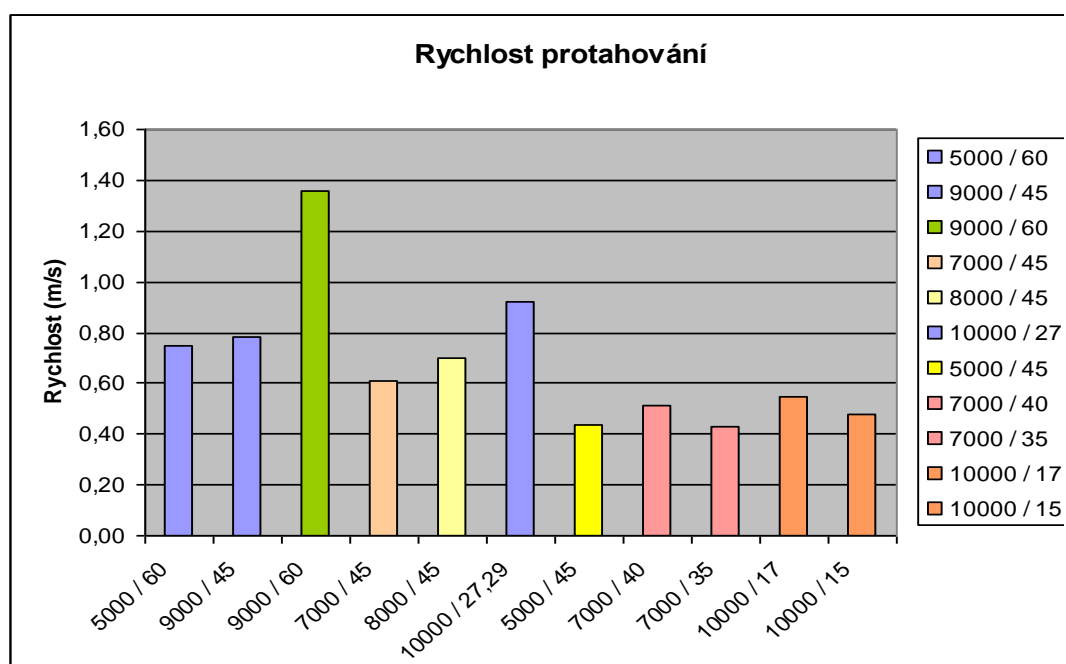
$n$  = počtu otáček foukacího kola

$$V_o = \pi * d * n \text{ [m/s]}$$

rychlost tažení se vypočítá:

$$V = T_g < \text{vačky} * V_o$$

Rychlost protahování je dána rychlostí otáčení foukacího kola a úhlem vačky, kterou kopíruje ložisko mechanismu protahovací tyče. Čím rychleji se točí foukací kolo, tím rychleji vačka dovolí protahovací tyči sjet dolů.



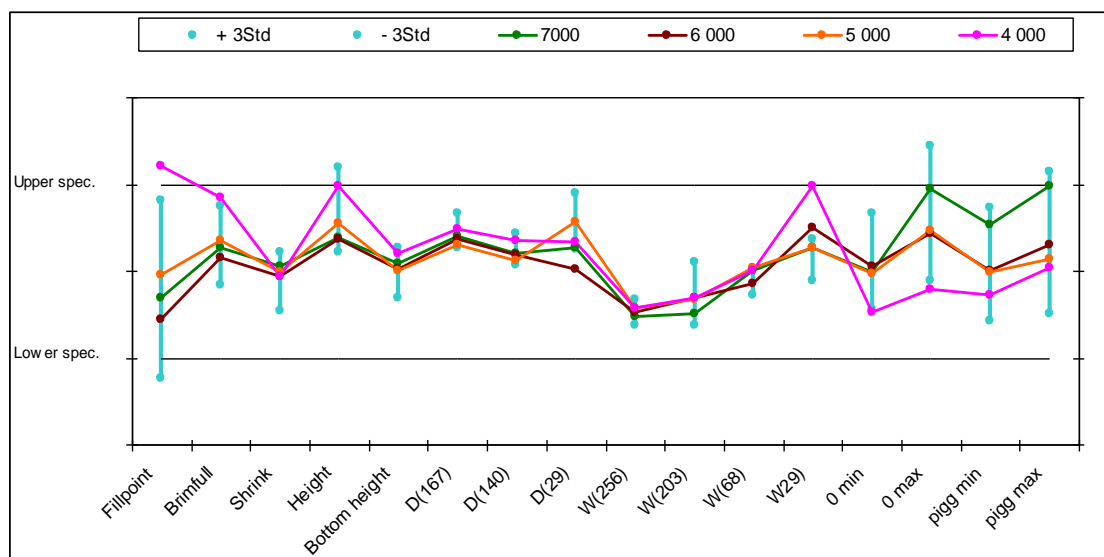
Graf 13 – vizualizace rychlosti protahování

Stroj	rychlost výroby (láhev/hod) / < vačky (°)	Tg <	D (m)	n (ot/hod)	n (ot/s)	Vo (m/s)	Rychlost tažení (m/s)	
SBO	5000 / 60	1,732	1,00	500	0,138	0,433	0,75	SIDEL
SBO	9000 / 45	1,000	1,00	900	0,250	0,785	0,79	SIDEL
SBO	9000 / 60	1,732	1,00	900	0,250	0,785	1,36	zkušnost ???
SBO	7000 / 45	1,000	1,00	700	0,194	0,609	0,61	Realita
SBO	8000 / 45	1,000	1,00	800	0,222	0,698	0,70	Realita
SBO 4	10000 / 27,29	0,515	2,05	1000	0,277	1,783	0,92	SIDEL
SBO	5000 / 45	1,000	1,00	500	0,138	0,433	0,43	zkušnost
SBO	7000 / 40	0,839	1,00	700	0,194	0,609	0,51	doporučení
SBO	7000 / 35	0,700	1,00	700	0,194	0,609	0,43	doporučení
SBO 4	10000 / 17	0,305	2,05	1000	0,277	1,783	0,54	doporučení
SBO 4	10000 / 15	0,267	2,05	1000	0,277	1,783	0,48	doporučení

Tabulka 5 – výpočty rychlosti tažení

Výsledná tabulka přehledně popisuje snižování rychlosti protahování.

V kombinaci s dalším testem Start-up se ukázalo, že rychlost protahování má opravdu vliv na spotřebitelské vlastnosti, tedy i na praskliny.



Graf 14 – Start up – testování nové produkce

Výsledky testů, které byly spojené s testováním rychlosti protahování, se projeví na LoopTestu takto:

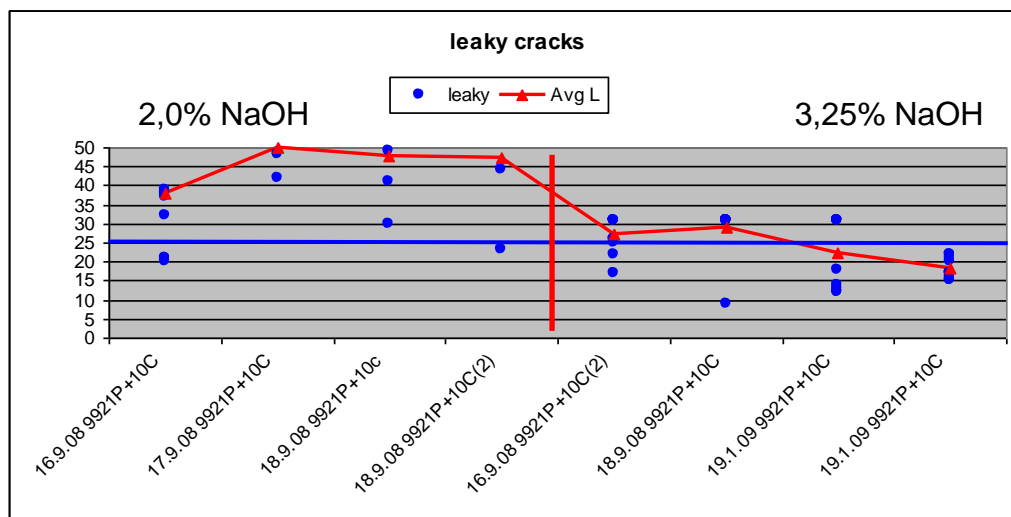
2,0% NaOH

3,25% NaOH



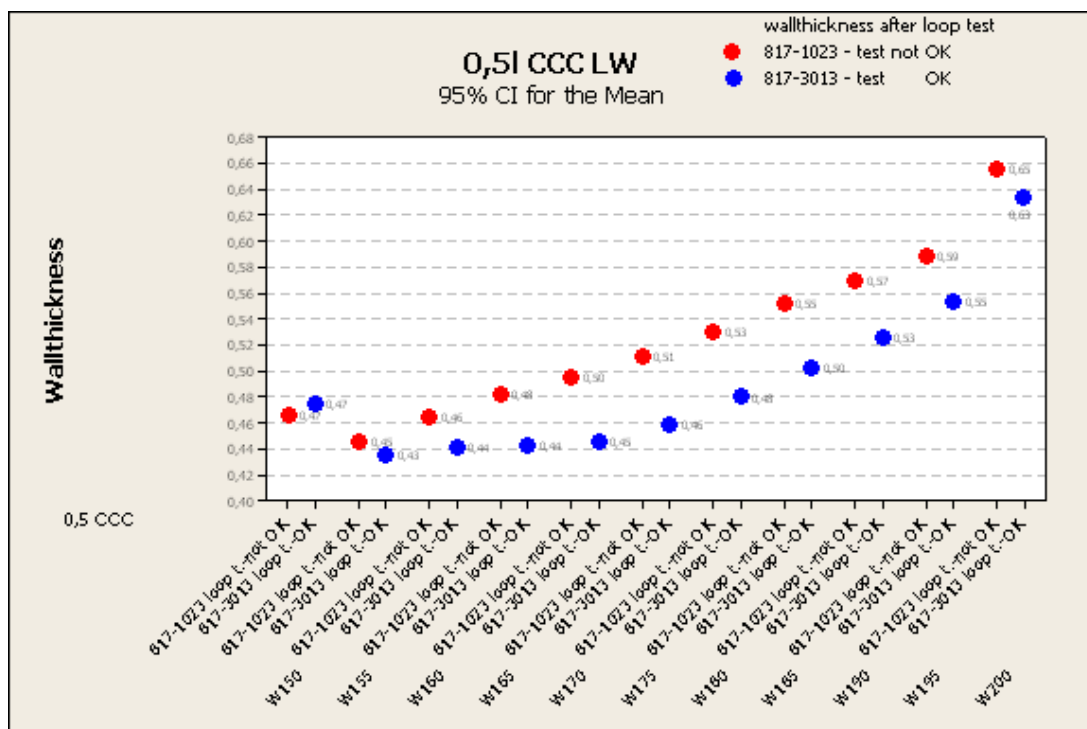
Graf 15 – LoopTest

P-Value 0,86 – statisticky významné, prakticky velmi nereálné.



Graf 16 – LoopTest, detekce propustných prasklin

V období projektu # 101 byl shodou okolností v činnosti ještě jeden projekt, který vnesl do situace projektu # 101 určitou pochybnost. Jednalo se o projekt Leight weight. Ve stručnosti se jedná o projekt, jehož cíle bylo snížit hmotnost produktu a nabídnout zákazníkovi lehčí a hlavně levnější láhev. Otázka, která vyvstala: „slabší stěna má či nemá vliv na praskavost lahvi“. Na níže uvedeném grafu je zřejmé, že odpověď je ne. Produkt se slabší stěnou obstál v LoopTest obstojněji. Z grafu je patrné, že silnější stěna v oblasti krku, není zárukou větší pevnosti lahve.



Graf 17 – Vizualizace výsledků LoopTestu



### 5.3 Návrhy vyplývající z analýzy projektu # 101

Celý projekt # 101 vznikl na základě reklamace, ztráty významného zákazníka a obrovských nákladů spojených s touto dodávkou. Společnost okamžitě reagovala a zvolila pro ni významnou metodu Six Sigma, jejíž podstatou byly analýzy spojené s nejrůznějšími testy a měřeními. V době vydání této diplomové práce nebyl projekt zcela ukončen, přesto je možné definovat některé závěry, návrhy řešení plynoucí z celého projektu:

- ❑ vytvořit přesnou metodiku k hledání vyfukovacího procesu
- ❑ sestavit databázi hlavních procesových kroků (parametrů), a to konkrétně pro každý typ lahve, jako podklady pro možnou analýzu procesů a jejich formalizaci.
- ❑ ostatní vstupy udržovat stabilní s minimálním rozptylem.

## 6 ZÁVĚR

Téma analýza příčin poruch plastů nabízí širokou škálu pohledů, testů i přístupů. Tato diplomová práce čerpá z konkrétního výzkumu prováděného ve společnosti a v žádném případě nenabízí detailní pohled na analýzu prasklin Ref.PET lahví, i když uvádí některá fakta z firemního know-how.

Analýza byla prováděna přístupem Six sigma, byly využity metody brainstormingu, monitoringu, konzultace a spolupráce s akademickou půdou (viz příloha), testování. Vše bylo prováděno s obrovským nasazením a hlavně velmi fundovaně. Pro účely této diplomové práce byly stanoveny 4 základní hypotézy, kdy byly v průběhu projektu vyvráceny a některé i potvrzeny. Při analýze tým sledoval únavu a celkovou kondici zaměstnanců, analyzoval i možný bojkot a snahu poškodit firmu. Nepotvrdila se tak první hypotéza, že vliv na praskliny má lidský faktor. Zajímavou analýzu prováděl tým při sledování výroby polotovaru na strojích Husky – vstřikování preforem – a na strojích SBO – vyfukování preforem. Praskliny se objevovaly všude bez ohledu na to, kde byl produkt připravován. Byla tak potvrzena druhá hypotéza, Praskliny se objevují všude bez ohledu na to, na jakém stroji byl připraven polotovar, na jakém stroji byl polotovar přeměněn ve finální výrobek.

Praktická část diplomové práce také nastínila systém přístupu realizačního týmu. Na počátku v rámci projektu Six Sigma bylo připraveno schéma jednotlivých kroků, postupů. Bylo samozřejmě nutné splnit i určité formality jako je přesné pojmenování subjektu, pro který je projekt realizován, jak budou zpracovávány monitorovací zprávy, jaká bude spolupráce a jak přesně se vymezí kompetence i odpovědnost. Poté byl detekován defekt a podroben nejrůznějším analýzám, mimo jiné ve spolupráci se ZČU, Ing. Kaiser, Ph.D., který zaslal fotografie prasklin pořízené laserovou mikroskopií. Určil tak druhy prasklin. Zvláštní místo zaujímá v testech tzv. LoopTest, který simuluje životní cyklus výrobku. Jedná se o vlastní test firmy a má srovnatelnou vypovídací váhu s testem Lifecycle. Jsou zde nastíněny jak testy interní, tak i externí.

Všechny informace, fakta použita v této diplomové práci vedla ke zmapování analýzy příčin prasklin na hrdle Ref.PET lahví a k nastínění systému práce realizačního týmu v rámci projektu Six sigma. Díky své účasti v tomto projektu jsem se tak mohl

podílet na skutečné výzkumné práci úzce spojené s praxí i konkrétní filozofií prosperující firmy a mohl tak sledovat, jak se prolínají vědomosti, znalosti se zkušenostmi.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1) Militký, J.: Přednášky: Textilní vlákna, Speciální vlákna, Liberec: TUL, 2007, ISBN 978-80-7372-169-5.
- 2) T.R. Crompton: z angl. přel. František Vlášil, Karel Volka; Analýza plastů, Praha: SNTL, 1989, ISBN 80-03-00162-5.
- 3) Miller, I.: Příručka Six Sigma, Praha: Interquality, spol. s r. o., 2008, ISBN 978-80-902770-4-5.
- 4) Procedura kontroly kvality, interní systém společnosti, Aš, 2007, [cit. 18 května 2008].
- 5) Instrukce kontroly kvality, interní systém společnosti, Aš, 2008, [cit. 18. května 2008].
- 6) Makromolekulární chemie, Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/009.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/009.html), [cit. 25. října 2009].
- 7) Plasty, Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Plasty\\_se\\_zkr%C3%A1cenou\\_%C5%BEivotnost%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Plasty_se_zkr%C3%A1cenou_%C5%BEivotnost%C3%AD), [cit. 2. listopadu 2009].
- 8) Struktura polymerů, Dostupné z: [http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni\\_odolnost/e-text/specialiste/4/4-4\\_Vliv\\_vyssich\\_teplot-plasty.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/4/4-4_Vliv_vyssich_teplot-plasty.pdf), [cit. 2. listopadu 2009].
- 9) Rozdělení plastů, Dostupné z: <http://ucivozs.sweb.cz/plast2.html>, [cit. 15. prosince 2009].
- 10) Plasty a jejich podstata, Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/plasty.pdf>, [cit. 15. prosince 2009].
- 11) Vlastnosti plastů, Dostupné z: <http://vseochemii.blogspot.com/2008/10/vlastnosti-plast.html>, [cit. 17. prosince 2009].

- 12) Plasty a jejich využití, Dostupné z: <http://www.modding.cz/?p=68>, [cit. 17. prosince 2009].
- 13) Plasty, Dostupné z: <http://studentka.sms.cz/referat/plasty>, [cit. 3. ledna 2010].
- 14) Monomer, polymer, Dostupné z: <http://static.howstuffworks.com/gif/plastic-7.gif>, [cit. 5. března 2010].
- 15) Morfologie plastů, Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm#013](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#013), [cit. 5. března 2010].

## 8 SEZNAM ZKRATEK

AA	.....	acetaldehyt
apod.	.....	a podobně
aj.	.....	a jiné
a.s.	.....	akciová společnost
atd.	.....	a tak dále
cca	.....	cirka
CI	.....	confidence interval
č.	.....	číslo (pořadové)
DMAIC	.....	matice Six Sigma (define, measure, analyse, improve, control)
DSC	.....	diferenční skenovací kalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry)
H <sub>2</sub> O	.....	voda
IV	.....	vnitřní viskozita
LW	.....	odlehčený produkt (leight weight)
max	.....	maximum
min	.....	minimum
MFI	.....	tok materiálu (melt flow index)
NaOH	.....	hydroxid sodný
např.	.....	například
obr.	.....	obrázek
p	.....	tlak [bar]
PC	.....	polykarbonát
PET (PE)	.....	polyetylen tereftalát
PF	.....	fenolformaldehyd
PI	.....	prediction interval
PLM	.....	švédský název výrobní společnosti
PMMA	.....	polymetylmatakrylát
POM	.....	polyoxietylén
popř.	.....	po případě

ppm	.....	miliontina (part per milion)
PPO	.....	polyfenilémoxid
PS	.....	polyester
PTFE	.....	polytetrafluoretylén
PU	.....	polyuretan
PVC	.....	polyvinylchlorid
RefPET	.....	vratná lahev
resp.	.....	respektive
SMED	.....	rychlost přestavby (single minute exchange of die)
s.r.o.	.....	společnost s ručením omezeným
str.	.....	strana
T	.....	teplota [°C]
tj.	.....	to je, to jest
Tg	.....	teplota zesklňování
Tm	.....	teplota tavení
TPM	.....	efektivní údržba (total preventive maintenance)
TUL	.....	Technická univerzita v Liberci
tzn.	.....	to znamená
tzv.	.....	tak zvané
Vo	.....	obvodová rychlost [m/s]
VSM	.....	sledování toků (value stream mapping)
ZČU	.....	Západočeská univerzita v Plzni
5S	.....	pořádek na pracovišti
6S	.....	statistická metoda

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1	.....	objekt společnosti (str. 10)
obr. 2	.....	ukázka výrobního portfolia (str. 12)
obr. 3	.....	DMAIC matice (str. 15)
obr. 4	.....	proces (str. 15)
obr. 5	.....	rozdělení polymerů (str. 22)

obr. 6	.....	lineární makromolekula (str. 23)
obr. 7	.....	rozvětvená makromolekula (str. 24)
obr. 8	.....	zesíťovaná makromolekula (str. 25)
obr. 9	.....	amorfní termoplast (str. 26)
obr. 10	.....	krystalická struktura (str. 26)
obr. 11	.....	sférolitická struktura (str. 27)
obr. 12	.....	mono- polymer (str. 29)
obr. 13	.....	strukturální vzorec PET (str. 30)
obr. 14	.....	HUSKY, SIDEL stroje (str. 35)
obr. 15	.....	prasklina-defekt na lahvi (str. 38)
obr. 16	.....	vstřikovací stroj (str. 39)
obr. 17	.....	vyfukovací kolo SIDEL stroje (str. 45)

## 10 SEZNAM SCHÉMAT

schéma 1	.....	nástroje Lean Enterprise (str. 13)
schéma 2	.....	ukazatele Lean Enterprise (str. 14)
schéma 3	.....	nástroje SixSigma (str. 17)
schéma 4	.....	procesní mapa (str. 34)
schéma 5	.....	LoopTest (str. 38)

## 11 SEZNAM TABULEK

tabulka 1	.....	klimatické podmínky (str. 36)
tabulka 2	.....	hodnoty DSC z TUL (str. 41)
tabulka 3	.....	hodnoty MVR z TUL – kritická výroba (str. 44)
tabulka 4	.....	hodnoty MVR z TUL – nekritická výroba (str. 44)
tabulka 5	.....	výpočty obvodové rychlosti (str. 46)

## 12 SEZNAM GRAFŮ

graf 1	.....	stav prodeje lahví (str. 12)
graf 2	.....	Ishikawa diagram (str. 32)
graf 3	.....	klimatické podmínky (str. 35)



graf 4	.....	detail extrému (str. 35)
graf 5	.....	výsledek LoopTestu (str. 36)
graf 6	.....	DSC stěny lahve (str. 39)
graf 7	.....	DSC resinu – TRW (str. 40)
grafy 8,9	.....	DSC resinu a stěny lahve – TUL (str. 41)
graf 10	.....	vizualizace měření IV (str. 43)
graf 11	.....	korelace specifikací pro naměřené hodnoty (str. 43)
graf 12	.....	výsledky LoopTestu (str. 44)
graf 13	.....	vizualizace rychlosti protahování (str. 45)
graf 14	.....	start-up lahví (str. 46)
graf 15	.....	výsledky LoopTestu (str. 47)
graf 16	.....	výsledky LoopTestu – propustné praskliny (str. 47)
graf 17	.....	výsledky LoopTestu – tloušťka stěny lahve (str. 48)

## 13 SEZNAM PŘÍLOH

### Příloha číslo 1

- Zpráva Ing. Jaroslava Kaiser, Ph.D. k praskavosti lahví

## **PŘÍLOHA:**



**Západočeská univerzita v Plzni**

**Fakulta strojní**

**Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

# **Komplexní řešení praskavosti PET lahví v oblasti krku**

**Autor:** Ing. Jaroslav Kaiser, Ph.D., IWE

**Vedoucí katedry:** Doc. Ing. Václav Mentl, CSc.

Plzeň, leden 2010

## 1. ÚVOD – ZADÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Dne 3. 6. 2009 byl oficiálně zahájen společný výzkum příčin vzniku trhlin v oblasti krku PET lahví.

Dodané lahve byly odebrány ze souboru ihned po výrobě, nebyly na nich provedeny ve firmě REXAM Petainer, s.r.o. Až žádné typy testů.

Konkrétně se jednalo o lahve pro nápoj Coca-Cola (objem 0,5 l) – 10 ks a pro minerální vodu (objem 0,75 l – GDB Mineralbrunnen) – 10 ks.

K pozorování, které bylo prováděno na pracovišti KMM FST ZČU v Plzni, byla použita makrolupa OLYMPUS SZ 61, pozorované lokality byly snímány digitální kamerou UEye (se stejnojmenným obslužným SW) a ukládány na notebook HP Acer. Bylo použito zvětšení, které umožňovalo seriózní pozorování a popis. Byly pozorovány lokality v místě dělicích rovin, a to od procesu vstřikování (u preform) a současně od procesu vyfukování, vždy na obou stranách lahví, tj. 4 lokality u každé lahve. Dělicí roviny u preformu a po vyfukování byly většinou oproti sobě posunuté. Vzdálenost od osazení lahví směrem od hrdla byla v obou případech přibližně 20 mm.

Pozn.: pozorované lokality byly označeny lihovým fixem. Stopa se v podobě bodu má pomoci pozorovateli lepší čitelnost na jednotlivých snímcích

## 2. VÝSLEDKY MAKROSKOPICKÉHO POZOROVÁNÍ

### 2.1 Pozorování lahví odebraných ihned z výrobní linky ve firmě Petainer, s.r.o. Až

Jednotlivé lahve byly detailně a pečlivě pozorovány v místech dělicích rovin u preformu i po vyfouknutí, a to v místech předpokládaného výskytu trhlin, tj. asi 2 cm pod osazením na hrdle lahve, jak je uvedeno v kap. 1. V Příloze č. 1 jsou uvedeny snímky dokumentující stav povrchu v těchto lokalitách u všech lahví. S fotodokumentace v Příloze č. 1 je patrné, že s největší pravděpodobností se tvořily zárodky defektů v dělicích rovinách u některých lahví, a to po operaci vyfukování. V dělicích rovinách preforem nebyly tyto skutečnosti pozorovány.

Následně byl celý soubor experimentálních vzorků lahví odeslán do firmy Petainer, s.r.o. Až k provedení 1. série testů.

## 2.2 Pozorování lahví po realizaci 1. série tzv. LoopTestu ve firmě Petainer s.r.o. Aš

Po detailní prohlídce lahví čerstvě odebraných z výrobní linky byla u všech lahví provedena 1. série tzv. loop testů. Tyto testy, dle informací Bc. Jiřího Němce, probíhaly v souladu s touto metodikou:

1. koupel lahví po dobu 15 min v louhové lázni 3,25% NaOH (agresivnější prostředí) při teplotě 59<sup>0</sup>C
2. následné umytí lahví, a to 1 minutu v horké vodě a poté ihned 1 minutu ve studené vodě
3. 15 minutová relaxace (bez osušení)
4. tlakový test při tlaku  $p = 5$  bar po dobu 30 sec pomocí vody (z centrálního rozvodu)
5. 15 minutová relaxace

Po realizaci těchto testů byly celý experimentální soubor opět odeslány na KMM ZČU Plzeň. Dle stejného scénáře byly všechny lahve prohlédnuty v problematických lokalitách, přičemž byla provedena opět fotodokumentace. Tato je součástí této zprávy a je plně uvedena v Příloze č. 2.

Lze říci, že při pozorování byl zjištěn větší výskyt defektů ve sledovaných lokalitách, přičemž defekty se nachází výhradně v dělicí rovině, která vzniká při operaci vyfukování.

## 3. DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ MAKROSKOPICKÉHO POZOROVÁNÍ

Již po výrobě lahví bylo možno pozorovat problematické lokality výskytu trhlin. Méně často tomu bylo u lahví o objemu 0,75 l – GDB Mineralbrunnen. Větší výskyt podobných defektů byl pozorován u lahví Coca-Cola o objemu 0,5 l.

Je možno se domnívat, že v těchto lokalitách se ve struktuře plastu objevuje napjatost, která má pravděpodobně původ z výroby, přesněji z operace vyfukování. Lze se rovněž domnívat, že dochází v těchto lokalitách k vyšší orientaci makromolekulárních řetězců nebo k procesu, který vede k vyšší uspořádanosti těchto řetězců. Důsledkem obou těchto procesů může docházet ke snížení houževnatosti v těchto malých objemech, což vytváří příznivější podmínky pro vznik defektů a

popřípadě k tvorbě a formování lomu, tedy destrukci. Možnou experimentální metodou se jeví rentgenografie.

#### **4. ZÁVĚR**

Domnívám se, že je rozumné v tomto pilotním experimentálním programu pokračovat ve snaze zcela objasnit příčiny vzniku trhlin ve sledovaných lokalitách a současně nalézt postup, který povede díky možným opatřením ve výrobě k jejich silné redukci či k úplnému odstranění.

Ukázalo se, že technika světelné mikroskopie ve spojení s mikroskopií konfokální přináší informace, které pomohly začít tento problém systematicky řešit. Doporučuji proto nadále pokračovat v dosavadních experimentech a jako návaznou experimentální metodu pro detailnější průzkum navrhuji metodu rentgenografie. Jako problém vidím skutečnost pracovat s lahvemi jako celky, což může v dalším postupu být závažnou překážkou při experimentálních pracích.